

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Veronika Blažič

**Računalniški model plenjenja jat rib:
Evolucija naprednih taktik pri
spremenljivi energiji posameznikov**

MAGISTRSKO DELO
MAGISTRSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: izr. prof. dr. Iztok Lebar Bajec

Ljubljana, 2019

AVTORSKE PRAVICE. Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljane ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

©2019 VERONIKA BLAŽIČ

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojemu mentorju izr. prof. dr. Iztoku Lebarju Bajcu za vse nasvete ter vodenje pri izdelavi magistrskega dela. Zahvaljujem se tudi doc. dr. Juretu Demšarju za vso pomoč na začetku dela in Nataši Hribar za vse ideje, trud ter izvrstno družbo. Hvala tudi mojim staršem za vso podporo, ki so mi jo nudili tekom celotnega študija.

Veronika Blažič, 2019

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Model skupinskega vedenja	5
2.1	Opis modela	5
2.2	Plen	6
2.3	Plenilec	8
3	Razširitev modela	15
3.1	Poraba energije	15
3.2	Zmedljivost plenilca med lovom (CF)	20
3.3	Sebični pobeg	21
3.4	Tavanje plenilca	22
4	Genetski algoritem	25
4.1	Začetna populacija	27
4.2	Cenilka	27
4.3	Izbor	28
4.4	Križanje	28
4.5	Mutacija	28

KAZALO

5	Rezultati	29
5.1	Osnovni rezultati	30
5.2	Optimizacija plena	36
5.3	Optimizacija plenilca	42
5.4	Vrednotenje rezultatov	58
6	Sklep	61
A	Grafı evolucije energijskih parametrov plena	67
B	Grafı evolucije energijskih parametrov plenilca	71

Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
BL	body length	dolžina telesa
BP	basic predator	preprosti plenilec
DP	dispersing predator	razpršitveni plenilec
NC	non confusable	brez zmedljivosti
CM	confusability by miss	zmedljivost plenilca ob poskusu ulova
CF	confusability by focus	zmedljivost plenilca med lovom

Povzetek

Naslov: Računalniški model plenjenja jat rib: Evolucija naprednih taktik pri spremenljivi energiji posameznikov

V magistrskem delu smo z uporabo računalniškega modela, v katerega smo postavili jato rib in plenilca, preučevali vpliv porabe energije na hitrost, uspešnost in izbor taktik napada plenilca. Poleg energije smo se dotaknili še zmedljivosti plenilca in skušali ovrednotiti združevanje v jate kot obliko uspešnega obrambnega mehanizma. Rezultate smo pridobili z uporabo genetskega algoritma, s pomočjo katerega smo skozi evolucijo plenilcev in plena simulirali naravno evolucijo. Ugotovili smo, da je uspešnost plenilca glede na izbrano taktiko napada močno odvisna od zmedljivosti plenilca. Pokazali smo tudi, da pri nekaterih taktikah napada združevanje rib v jate pripomore k višji stopnji preživetja, pri drugih pa je za ribe boljše, če se odločijo za sebični pobeg.

Ključne besede

simulacija, skupinsko vedenje, jata rib, odnos plenilec-plen

Abstract

Title: Simulating predator attacks on fish schools: Evolving composite tactics with variable energies

We used a computer model containing a flock of fish and a predator to evaluate the effect of energy on predator speed and success of various attack tactics. We also looked into predator confusability and tried to determine whether fish form flocks as a form of a defense mechanism. Results were obtained using a genetic algorithm. We simulated natural evolution of predators and prey, and came to conclusion that the best attack tactic is highly dependant on predator's method of confusability. Moreover, we showed flocking increases the chance of individual survival in certain attack tactics, while it decreases the chance of individual survival in others.

Keywords

simulation, collective behavior, fish school, predator-prey relation

Poglavje 1

Uvod

Skupinsko vedenje (*angl. collective animal behaviour*) je fenomen, ki je zelo pogost pri številnih vrstah organizmov. Takšen primer so bakterije, insekti, ptice in ljudje [1]. Najverjetneje se je oblikovalo, ker predstavlja korist tako za posamezne člane skupine kot za celotno skupino. Največja skupina vretenčarjev, pri kateri lahko opazimo številne različne oblike skupinskega vedenja, so zagotovo ribe. Jate rib vsebujejo veliko število posameznikov, ki so usmerjeni v isto smer, enakomerno porazdeljeni po prostoru in se premikajo z enako hitrostjo [2, 3]. Premikanja ne koordinira zgolj en posameznik, vodja skupine, ampak k temu prispeva vsak posameznik znotraj nje. Jate rib so sposobne hitrih sprememb smeri in hitrosti, za katere se na prvi pogled zdi, da se pri njih vsi člani skupine odzovejo istočasno. V resnici pa je med akcijami posameznikov časovni zamik [2, 3], ki pa je zelo majhen. Zakaj so ribe razvile tako napredno obliko skupinskega vedenja, je zelo zanimivo vprašanje, s katerim se ukvarjajo številni raziskovalci. Nekatere teorije pravijo, da je združevanje v jate za ribe oblika obrambnega mehanizma, katerega namen je zмести plenilce in povečati verjetnost preživetja posameznikov [4, 5, 6]. Po drugih teorijah tovrstno združevanje posameznikom pomaga pri varčevanju z energijo [7, 8], razmnoževanju in iskanju hrane [9]. V naši raziskavi se bomo osredotočili predvsem na teorijo, ki govori o tem, da združevanje rib v jate poveča možnost preživetja njenih članov, poveča količino ohranjene energije

preživelih in zmanjša uspešnost plenilca pri napadu.

S pomočjo eksperimentalnih študij z živimi živalmi bi sicer verjetno lahko natančno definirali, zakaj se posamezniki združujejo v skupine na točno takšen način, kot to počnejo v naravi, a so nekateri od eksperimentov (npr. namerno izpostavljanje plenilcem) etično sporni oz. časovno predolgotrajni. Računalniški modeli so odlična alternativa, s katero simuliramo naravo in vedenje omenjenih organizmov. S tovrstnimi modeli lahko v kontroliranem okolju z uporabo različnih optimizacijskih algoritmov identificiramo parametre, ki najbolj vplivajo na uspešnost bodisi plenilca ali plena, to pa nas privede do boljšega razumevanja dogajanja v naravi.

Številni obstoječi računalniški modeli kažejo na to, da združevanje posameznikov v skupine lahko deluje kot obrambni mehanizem pred napadom plenilca. V njih se navadno uporablja genetske algoritme za umetno simulacijo evolucije. Simulacija evolucije nam lahko pomaga razumeti, kateri dejavniki so spodbudili razvoj združevanja v skupine. Kunz in sod. [10] so razvili nevronske mreže, s katerimi so pokazali, da je lahko prisotnost zmedljivega plenilca zadosten razlog za evolucijski nastanek skupinskega pobega. Podobne rezultate so dosegli tudi Olson in sod. [11, 12], ki so poleg tega pokazali, da je združevanje kot oblika obrambe uspešnejše, če plenilec napade sebi najbližjo tarčo. V primeru, da se odloči za tarčo, ki se ne nahaja na robu skupine, se obramba v obliki združevanja kot rezultat evolucije razvije manj pogosto. Demšar in sod. [13] so kasneje uporabili genetske algoritme za simulacijo evolucijskega razvoja plenilčevih taktik napada in pokazali, da igra zmedljivost plenilca veliko vlogo pri evoluciji le teh.

V okviru magistrske naloge bomo nadgradili računalniški model, ki so ga razvili Demšar in sod. [13]. Naša različica bo poleg skupinskega vedenja plenilec-plen posnemala tudi porabo energije in posledično utrujenost posameznika, kar bomo simulirali kot spremembo hitrosti glede na nivo posameznikove energije in trenutno stanje v modelu. Podrobneje si bomo pogledali tudi, kako tip zmedljivosti plenilca vpliva na izbor plenilčevih taktik napada in uspešnost napadov, ter kakšno vlogo pri tem igra varčevanje z

energijo. V prvem sklopu poskusov bomo določili najuspešnejšo taktiko napada plenilca glede na uporabljen tip zmedljivosti brez upoštevanja porabe energije. V drugem sklopu bomo porabo energije dodali plenu ter ga skozi evolucijo optimizirali glede na rezultate iz prvega sklopa. Nazadnje bomo porabo energije dodali še plenilcu ter poiskali optimalne vrednosti parametrov napada glede na optimiziran plen iz prejšnjega sklopa poskusov.

Poglavje 2

Model skupinskega vedenja

Naše delo temelji na modelu skupinskega vedenja, ki so ga razvili Demšar in sodelavci. To poglavje vsebuje opis modela in je povzeto po članku [13], vsebuje pa tudi opis manjših implementiranih sprememb, kot so na primer spremenjene vrednosti parametrov.

2.1 Opis modela

V modelu razlikujemo dva tipa agentov: plenilca in plen. Plenilec je v modelu le eden, medtem ko je lahko agentov, ki pripadajo plenu, poljubno mnogo. Za potrebe naših simulacij je jata štela 100 agentov. Plenilec skuša ujeti čim več agentov, ki pripadajo plenu, ti pa se mu skušajo čim bolje izogniti. Za najvišje hitrosti smo izbrali privzete hitrosti, ki so jih v svojem delu uporabili Demšarja in sod. [14], privzete hitrosti smo nastavili po razmerju $1,4 \times v_{min}$, najnižje hitrosti v_{min} pa smo določili kot 1 BL/s. Privzeta hitrost (*angl. cruising speed*) je definirana kot hitrost, s katero riba plava pri umirjenem plavanju, za katerega porabi zanemarljivo malo energije.

Ker številne raziskave kažejo na to, da dimenzija modela minimalno vpliva na tovrstne računalniške simulacije [15], je model, tako kot osnovni [13], zaradi manjše računske zahtevnosti dvodimenzionalen.

2.2 Plen

Plen je modeliran po vzoru vrste ribe *Pseudomugil signifer* (slika 2.1), ki je znana po tem, da plava v jatah. Gre za manjše ribe, dolžine približno 3 cm (BL), za katere smo določili, da plavajo z najnižjo hitrostjo 1 BL/s, privzeto hitrostjo 1,4 BL/s in najvišjo hitrostjo 4 BL/s. Maksimalen pospešek smo nastavili na 2 BL/s². Vidno polje plena obsega 300°, kar pomeni, da imajo agenti za sabo 60° velik mrtvi kot. Vse vrednosti parametrov plena se nahajajo v tabeli 2.1.



Slika 2.1: Plen je modeliran po vzoru *Pseudomugil signifer* na sliki. Vir: <https://www.seriouslyfish.com/species/pseudomugil-signifer/>.

Na premikanje plena vplivajo štirje nagoni: razmik, izravnavna, vezljivost in pobeg. Vsi prispevajo k izračunu pospeška, kar lahko vidimo v enačbi (2.1). Vsak posamezen w_i predstavlja utež posameznega nagona, \mathbf{a}_i pa pospeške, izračunane za vsakega od njih. Skupen pospešek izračunamo po formuli

$$\mathbf{a} = w_s \mathbf{a}_s + w_a \mathbf{a}_a + w_c \mathbf{a}_c + w_e \mathbf{a}_e, \quad (2.1)$$

ki po vrsti obravnava težnje razmika, izravnavne, vezljivosti in pobega. Razmik (*angl. separation*) služi za to, da med agenti ne pride do trkov. Izravnavna (*angl. alignment*) uskladi smeri in hitrosti agentov, da razlike med njimi niso

Tabela 2.1: Vrednosti parametrov za plen *Pseudomugil signifer*.

Parameter	Vrednost	Opis
BL	3 cm	Dolžina plena
v_{max}	4,0 BL/s	Najvišja hitrost plena
v_c	1,4 BL/s	Privzeta hitrost plena
v_{min}	1,0 BL/s	Najnižja hitrost plena
a_m	2,0 BL/s ²	Največji možen pospešek plena
w_s	5,0 s ⁻²	Utež za ločevanje
w_a	0,3 s ⁻¹	Utež za poravnavo
w_c	0,01 s ⁻²	Utež za kohezijo
w_e	5,0 s ⁻²	Utež za pobeg

prevelike in ostanejo v strnjeni jati. Vezljivost (*angl. cohesion*) predstavlja privlačnost med oddaljenimi agenti, kar se kaže kot ponovno združevanje razbitih jat. Pobeg (*angl. escape*) se odraža v obliki pospeška v smeri stran od plenilca. Hitrost in smer premikanja v naslednjem časovnem koraku simulacije iz pospeška dobimo z uporabo formule

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} + \mathbf{a}\Delta t, \quad (2.2)$$

pri čemer je pospešek navzgor omejen z največjim možnim pospeškom plena a_m . Položaj v naslednjem koraku simulacije izračunamo po formuli

$$\mathbf{p}' = \mathbf{p} + \mathbf{v}'\Delta t, \quad (2.3)$$

kjer je \mathbf{v} trenutna hitrost in smer premikanja plena, \mathbf{p} pa njegov trenuten položaj. Hitrosti plena $\|\mathbf{v}\|$ in $\|\mathbf{v}'\|$ sta omejeni. V primeru, ko je trenutna hitrost višja od najvišje možne hitrosti plena v_{max} , se ta omeji z v_{max} , v primeru, da je nižja od v_{min} pa na v_{min} .

Razmik \mathbf{a}_s modelira željo po izogibanju trkom z ostalimi agenti plena. Izračunamo ga kot

$$\mathbf{a}_s = \frac{1}{|N_s|} \sum_{j \in N_s} \left(-\hat{\mathbf{d}}_j \left(1 - \frac{\|\mathbf{d}_j\|}{r_s} \right) \right), \quad (2.4)$$

kjer je N_s množica sosedov, ki so znotraj območja razmika obravnavanega plena s polmerom r_s in \mathbf{d}_j vektor, ki kaže od obravnavanega plena do izbranega vrstnika j .

Izravnavo \mathbf{a}_a sinhronizira smeri in hitrosti premikanja med člani jate, tako da plavajo s približno enakimi hitrostmi, zato da se jata ne razcepi. Izračunamo ga kot

$$\mathbf{a}_a = \left(\frac{1}{|N_a|} \sum_{j \in N_a} \mathbf{v}_j \right) - \mathbf{v}, \quad (2.5)$$

kjer je N_a množica sosedov, ki so znotraj območja izravnave obravnavanega plena s polmerom r_a , \mathbf{v}_j hitrost in smer obravnavanega sosedu, \mathbf{v} pa hitrost in smer obravnavanega plena.

Vezljivost \mathbf{a}_c modelira privlačnost oddaljenih agentov in skrbi za ponovno združevanje razcepljenih jat v večje. Izračunamo ga kot

$$\mathbf{a}_c = \frac{1}{|N_c|} \sum_{j \in N_c} \mathbf{d}_j, \quad (2.6)$$

kjer je N_c množica sosedov, ki se nahajajo izven območja izravnave obravnavanega plena, ampak so znotraj njegovega območja vezljivosti s polmerom r_c .

Pobeg \mathbf{a}_e predstavlja željo obravnavanega plena po pobegu. Plen se želi odmakniti v smeri stran od plenilca s pospeškom

$$\mathbf{a}_e = -\hat{\mathbf{d}}_p \left(1 - \frac{\|\mathbf{d}_p\|}{r_e} \right), \quad (2.7)$$

kadarkoli je plenilec v območju pobega s polmerom r_e . V nasprotnem primeru se nagon pobega ne upošteva in je vrednost \mathbf{a}_e enaka $\mathbf{0}$.

2.3 Plenilec

Plenilca smo modelirali po vzoru ribe vrste *Philypnodon grandiceps* (slika 2.2) dolžine približno 9 cm, za katero smo opredelili, da plava z najnižjo hitrostjo 3 BL/s (1 BL_p/s), privzeto hitrostjo 4,2 BL/s (1,4 BL_p/s) in najvišjo hitrostjo 5,6 BL/s (1,9 BL_p/s). Plenilci so običajno hitrejši, a manj gibčni kot plen,

zato smo pospešek plenilca nastavili na $2,5 \text{ BL/s}^2$. Ker se model osredotoča na izbor taktik napada in uspešnost napada ter ne toliko na taktike pobega, je vidno polje plenilca v modelu 360° , razdalja do katere je sposoben zaznavati pa je določena s parametrom *huntSize* (800 BL). S tem se zmanjša možnost, da preneha z napadom, ker ne vidi več plena. Vse vrednosti parametrov plenilca se nahajajo v tabeli 2.2.



Slika 2.2: Plenilec je modeliran po vzoru *Philypnodon grandiceps* na sliki. Vir: <http://fishesofaustralia.net.au/home/species/56>.

Tabela 2.2: Vrednosti parametrov za plenilca *Philypnodon grandiceps*.

Parameter	Vrednost	Opis
BL_p	3 BL	Dolžina plenilca
v_{maxp}	5,6 BL/s	Najvišja hitrost plenilca
v_{cp}	4,2 BL/s	Privzeta hitrost plenilca
v_{minp}	3,0 BL/s	Najnižja hitrost plenilca
a_{mp}	$2,5 \text{ BL/s}^2$	Največji možen pospešek plenilca
<i>huntSize</i>	800 BL	Globina vidnega polja plenilca
<i>handlingTime</i>	30 s	Čas trajanja faze obdelave

Plenilca vodi le nagon napada. Ko izbere tarčo, uporabi tehniko klasičnega zasledovanja plena. Usmeri se naravnost proti izbrani tarči, tako da je ta na sredini njegovega vidnega polja. Nagon izračunamo kot

$$\mathbf{a}_h = \begin{cases} a_h \hat{\mathbf{d}}_t; & \text{če je } \|\mathbf{d}_t\| \leq r_h \\ \mathbf{0}; & \text{sicer} \end{cases}, \quad (2.8)$$

kjer t predstavlja njegovo tarčo, a_h pospešek uporabljen pri napadu, r_h pa polmer območja napada. V primeru, da znotraj območja r_h ni nobene potencialne tarče, se plenilec premika naravnost naprej in ne spreminja hitrosti in smeri. Vektor hitrosti za plenilca v vsakem koraku izračunamo kot

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} + \mathbf{a}_h \Delta t. \quad (2.9)$$

Hitrosti plenilca $\|\mathbf{v}\|$ in $\|\mathbf{v}'\|$ sta omejeni. V primeru, ko je trenutna hitrost višja od najvišje možne hitrosti plena v_{maxp} , se ta omeji z v_{maxp} , v primeru, da je nižja od v_{minp} pa z v_{minp} .

V modelu lahko plenilcu v osnovi določimo dve različni taktiki napada: mešanico preprostih taktik ali razpršitveno taktiko.

2.3.1 Faza obdelave

Po uspešnem ulovu plenilec preide v fazo obdelave (*angl. handling*). V tej fazi upočasni do privzete hitrosti v_{cp} in jo ohranja za dolžino *handlingTime*. Po pretečenem času si poišče novo tarčo in ponovno preide v fazo lova.

2.3.2 Mešanica preprostih taktik

Pri mešanici preprostih taktik ima plenilec možnost izbora najbližjega plena, najbolj obrobne plena ali najbolj središčnega plena. Najbližji plen dobimo tako, da primerjamo razdalje med vsemi člani jate in plenilcem ter izberemo kandidata z najmanjšo razdaljo. Najbolj obroben plen določimo tako, da za vsak plen izračunamo povprečje smernih vektorjev, ki kažejo v smeri sosedov v njegovem območju vezljivosti. Pri najbolj obrobem bo dolžina

Tabela 2.3: Parametri izbora preproste taktike.

Parameter	Vrednost	Opis
nw	$[0, 1]$	Verjetnost izbora najbližjega plena
cw	$[0, 1]$	Verjetnost izbora središčnega plena
pw	$[0, 1]$	Verjetnost izbora obrobnega plena

povprečnega vektorja najvišja. Nasprotno bo dolžina povprečnega vektorja pri najbolj središčnem plenu najnižja. Pri najbolj obrobem plenu pazimo še na to, da se le-ta ne nahaja na delu jate, ki bi bil plenilcu zaradi preostale jate neviden (v njenem ozadju). To dosežemo s tem, da iz obravnave izključimo ves plen, pri katerem je kot med izračunanim povprečnim vektorjem in vektorjem, ki kaže v smeri od plenilca proti obravnavanemu plenu zunaj območja $\pm 90^\circ$.

Plenilec, ki se pri napadu poslužuje mešanice preprostih taktik, ima poleg osnovnih zato še tri dodatne parametre. Ti so uteži, ki definirajo verjetnost izbora posamezne preproste taktike. Kot je predstavljeno v tabeli 2.3 lahko vrednosti teh parametrov zavzamejo katero koli vrednost na intervalu med nič in ena, pri čemer vrednost nič pomeni, da te taktike ne bo nikoli uporabil, vrednost ena pa da jo bo vedno uporabil. Vsota vseh treh vrednosti je vedno enaka ena.

2.3.3 Razpršitvena taktika

Pri razpršitveni taktiki se plenilec najprej zapodi v središče jate s ciljem, da jo razprši. Ker skuša plen čim bolj povečati razdaljo med sabo in plenilcem, je po opravljeni prvi fazi jata razpršena v vsaj v dve podjati. V tem trenutku si plenilec za tarčo izbere najbolj obroben plen v svoji bližini in do konca iteracije nadaljuje z zasledovanjem te tarče.

Obnašanje plenilca pri razpršitveni taktiki je določeno z dvema parametroma. Prvi je razdalja od središča jate, pri kateri plenilec preneha z razpr-

ševanjem, drugi pa opredeljuje razdaljo, na kateri plenilec po opravljeni fazi razprševanja išče najbolj obrobno tarčo. Kot je prikazano v tabeli 2.4 sta oba parametra omejena z velikostjo območja lova plenilca.

Tabela 2.4: Parametri razpšitvene taktike.

Parameter	Vrednost	Opis
lr	$[1, huntSize]$	Razdalja iskanja najbolj obrobne tarče po opravljeni fazi razprševanja
ld	$[1, huntSize]$	Razdalja od središča, pri kateri se konča faza razprševanja

2.3.4 Zmedljivost plenilca ob poskusu ulova (CM)

Ko plenilec pride dovolj blizu zasledovane tarče, jo napade. V tem trenutku je lahko v bližini številnega plena, ki plava tesno skupaj. Demšar in sod. [13] so v modelu zato predpostavili, da lahko plenilec ob poskusu ulova tarče (ko ji je dovolj blizu), slednjo zaradi prevelikega števila vizualno podobnih osebkov v bližini zgreši, je ne ulovi in si mora izbrati novo. Ta tip zmedljivosti, pri katerem plenilec ob poskusu ulova zgreši tarčo, bomo v delu označevali z oznako CM. Verjetnost, da do tega pride, je večja, če je število agentov, ki vplivajo na zmedljivost plenilca, večje. Ti so določeni kot agenti, katerih razdalja do trenutne plenilčeve tarče je manjša od parametra, ki določa velikost polja za zmedljivost. Algoritem 1 vsebuje psevdokodo za računanje zmedljivosti plenilca.

Algoritem 1 Psevdokoda računanja zmedljivosti CM

```
1:  $zmedenost \leftarrow 1 /$  (število agentov v polju zmedljivosti)
2:  $naključnoŠtevilo \leftarrow randomFloat(0, 1)$ 
3: if  $naključnoŠtevilo < zmedenost$  then
4:   plenilec ujame tarčo
5: else
6:   plenilec izbere novo tarčo
7: end if
```

Poglavje 3

Razširitev modela

V tem poglavju bomo opisali metode, ki smo jih uporabili za razširitev osnovnega modela. Ker se naloga ukvarja predvsem s porabo energije na obnašanje agentov, smo uporabljeno metodo opisali v razdelku 3.1. Implementirali smo tudi novo metodo za modeliranje zmedljivosti plenilca. Osnovna metoda računanja zmedljivosti plenilca je opisana v razdelku 2.3.4.

3.1 Poraba energije

Implementirali smo metodo, s pomočjo katere računamo spremembe energije skozi čas. Največjo vlogo pri porabi energije igra hitrost, saj velja da hitreje,

Tabela 3.1: Vrednosti parametrov pri uporabljeni metodi.

Parameter	Vrednost	Opis
E_{max}	1	Najvišja vrednost energije
q	0,001	Utež porabe energije zaradi hitrosti
p	0,002	Utež porabe energije zaradi spremembe smeri
ϵ_{coll}	0,002	Utež porabe energije zaradi trka
N_{thre}	2	Št. trkov pred izgubo plavalne sposobnosti
d_{attack}	50 BL	Razpon pahljače za izbor tarče

kot riba plava, več energije porabi in počasneje, kot plava, več energije regenerira. Modelu smo dodali tudi nove evolucijske parametre, ki agentom pomagajo pametno razpolagati s preostalo energijo.

Metoda za računanje porabe energije temelji na članku Zhenga in sodelavcev [16]. Sestavljena je iz treh delov, od katerih se vsak ukvarja z različno aktivnostjo, ki od ribe zahteva porabo energije.

$$\begin{aligned} \Delta E = & q \frac{E_{max}}{v_{av}} (v_c - v) \\ & - p \frac{E_{max}}{\pi^2} (\Delta\alpha)^2 \\ & - \epsilon_{coll} E_{max} \times N_{coll} \times \exp(N_{coll}/N_{thre}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

V enačbi (3.1) so q , p in ϵ_{coll} uteži za posamezne dele enačbe. Povprečno hitrost v_{av} računamo kot $(v_{max} + v_{min})/2$, $\Delta\alpha$ je kot, ki ga oklepata vektorja, ki določata smer gibanja, v zadnjih dveh časovnih iteracijah, N_{coll} je število trkov z ostalimi ribami, N_{thre} pa meja števila trkov, po presegu katere riba izgubi plavalno sposobnost. Vrednosti parametrov, ki smo jih uporabili v enačbi (3.1) se nahajajo v tabeli 3.1.

Prvi del enačbe (3.1) predstavlja spremembo energije, ki nastane ob premikanju ribe v izbrani smeri v majhnem časovnem intervalu Δt . V našem modelu lahko plavanje rib glede na hitrost v grobem klasificiramo v dve skupini: počasno plavanje in hitro plavanje, ki od ribe zahteva večjo količino energije ter ribo zelo hitro utruje. Pri počasnem plavanju riba plava s privzeto hitrostjo v_c in je energija, ki jo riba pridobiva, enaka porabljeni, zato je ta del enačbe pri počasnem plavanju enak nič. Drugi del enačbe (3.1) predstavlja spremembo energije zaradi spremembe smeri plavanja ribe. Zadnji del enačbe upošteva izgubo energije zaradi trkov z drugimi ribami. Ribi trčita, ko je razdalja med njima manjša od 2 BL. Konstantna vrednost N_{thre} določa kdaj je riba doživela preveč trkov, da bi lahko nadaljevala s plavanjem.

Pri plenilcu zadnjega dela enačbe nismo upoštevali, saj ne plava v jati in so trki zanj načeloma koristni. V primeru, da bi ga upoštevali, bi plenilec ob vsakem trku izgubil 0,2% svoje začetne energije. Ker se plen izmika plenilcu, pride vsakič, ko se plenilec zapodi v jato, do 0-2 trkov. Najpogosteje se zaleti

Tabela 3.2: Začetne vrednosti evolucijskih parametrov varčevanja z energijo za plen.

Parameter	Vrednost	Opis
wb	$[0, 1]$	Utež upočasnjevanja iz vb
wr	$[0, 1]$	Utež pospeševanja iz vr
we	$[0, 1]$	Utež upočasnjevanja zaradi nižanja preostale energije
$cn0$	$[v_{min}, v_{max}]$	Hitrost nad katero plen upočasnjuje
$cn1$	$[0, 50]$	Intenzivnost upočasnjevanja iz vb
$cn2$	$[v_{min}, v_{max}]$	Hitrost pod katero plen pospešuje
$cn3$	$[0, 50]$	Intenzivnost pospeševanja iz vr
$cr0$	$[0, 1]$	Energija pri kateri začne plen upočasnjevati
$cr1$	$[0, 50]$	Intenzivnost upočasnjevanja zaradi energije
vb	$[v_c, v_{max}]$	Najvišja hitrost pobega
vr	$[v_{min}, v_c]$	Hitrost počivanja

zgolj v svojo tarčo, ostale ribe pa vodi pogon pobega in se odmaknejo od njega, tako se na poti iz jate ne dotakne nobene. V primeru, da bi upoštevali ta del enačbe, bi plenilca kaznovali za vsak ulov.

3.1.1 Evolucijski parametri ohranjanja energije

Kot smo že omenili tako plenilec kot plen porablja energijo glede na svojo trenutno hitrost. Ker ohranjanje najvišjih hitrosti ni vedno nujno, sploh pa ne varčno, smo tako plenilcu kot plenu opredelili dve novi hitrosti; vr , hitrost pri kateri skuša riba regenerirati svojo energijo, in vb , najvišjo hitrost, ki si jo riba glede na porabo energije še dovoli. Poleg tega smo ribam dodali še tri nagone, ki skrbijo za vračanje v privzeto hitrost v_c . Novi parametri so zapisani v tabelah 3.2 in 3.3. Pri plenu parameter vb določa hitrost med najvišjo možno hitrostjo v_{max} ter privzeto hitrostjo v_c . Ker smo opredelili, da se raven energije pri plavanju ob privzeti hitrosti v_c ne spreminja, smo

Tabela 3.3: Začetne vrednosti evolucijskih parametrov varčevanja z energijo za plenilca.

Parameter	Vrednost	Opis
wb_p	$[0, 1]$	Utež upočasnjevanja iz vb_p
wr_p	$[0, 1]$	Utež pospeševanja iz vr_p
we_p	$[0, 1]$	Utež upočasnjevanja zaradi nižanja nivoja energije
$cn0_p$	$[v_{minp}, v_{maxp}]$	Hitrost nad katero plenilec upočasnjuje
$cn1_p$	$[0, 50]$	Intenzivnost upočasnjevanja iz vb_p
$cn2_p$	$[v_{minp}, v_{maxp}]$	Hitrost pod katero plenilec pospešuje
$cn3_p$	$[0, 50]$	Intenzivnost pospeševanja iz vr_p
$cr0_p$	$[0, 1]$	Energija pri kateri začne plenilec upočasnjevati
$cr1_p$	$[0, 50]$	Intenzivnost upočasnjevanja zaradi energije
vb_p	$[v_{cp}, v_{maxp}]$	Najvišja hitrost lova
vr_p	$[v_{minp}, v_{cp}]$	Hitrost počivanja
ap_p	$[1, 600]$	Dolžina posameznega napada
da_p	$[0, 600]$	Razdalja do tarče za začetek pospeševanja

dodali še hitrost počivanja vr , ki zavzema vrednost med v_{min} ter v_c . Hitrost počivanja vr določa najnižjo hitrost plavanja, ki jo bodo agenti uporabili, če bodo še premogli nekaj energije in si bodo želeli zgolj odpočiti. Hitrost regeneracije je določena glede na odstopanje od najnižje hitrosti v_{min} . Enako velja tudi za plenilca, le da so vrednosti določene s parametri iz tabele 3.3.

Za potrebe varčevanja z energijo smo tako plenilcu kot plenu dodali še tri nove nagone. Skozi enačbe (3.2), (3.3) in (3.4) so nagoni opisani s parametri plena. Za plenilca so enačbe enake, le da se namesto parametrov iz tabele 3.2 uporabi primerljive iz tabele 3.3.

Nagon, ki skrbi za težnjo po vrnitvi iz najvišje hitrosti v privzeto hitrost \mathbf{a}_b je definiran kot

$$\mathbf{a}_b = -\hat{\mathbf{v}}wb \min \left(\max \left(\frac{\|\mathbf{v}\| - cn0}{v_{max} - cn0}, 0 \right), 1 \right)^{cn1}, \quad (3.2)$$

kjer je wb utež upočasnjevanja, $cn0$ hitrost, pri kateri riba začne z upočasnjevanjem, $cn1$ pa intenzivnost upočasnjevanja. Nabor možnih vrednosti za vse tri parametre je za plen definiran v tabeli 3.2, za plenilca pa v tabeli 3.3. Pospešku se nagon \mathbf{a}_b prišteje, ko velja $\|\mathbf{v}\| > cn0$.

Nagon, ki skrbi za težnjo po vrnitvi iz najnižje hitrost v privzeto hitrost \mathbf{a}_r je določen kot

$$\mathbf{a}_r = \hat{\mathbf{v}}wr \min \left(\max \left(\frac{cn2 - \|\mathbf{v}\|}{cn2 - v_{min}}, 0 \right), 1 \right)^{cn3}, \quad (3.3)$$

kjer je wr utež pospeševanja, $cn2$ hitrost, pri kateri riba začne s pospeševanjem, $cn3$ pa intenzivnost pospeševanja. Nabor možnih vrednosti za vse tri parametre je za plen definiran v tabeli 3.2, za plenilca pa v tabeli 3.3. Pospešku se nagon \mathbf{a}_b prišteje, ko velja $\|\mathbf{v}\| < cn2$.

Nazadnje smo dodali še nagon \mathbf{a}_{en} , ki skrbi za to, da riba ob nižjih ravneh energije zmanjša hitrost svojega plavanja. Definiran je kot

$$\mathbf{a}_{en} = -\hat{\mathbf{v}}we \min \left(\max \left(\frac{cr0 - energy}{cr0}, 0 \right), 1 \right)^{cr1}, \quad (3.4)$$

kjer je we utež upočasnjevanja, $cr0$ raven energije, pri kateri riba začne z upočasnjevanjem, $cr1$ pa intenzivnost upočasnjevanja. Nabor možnih vre-

dnosti za vse tri parametre je za plen definiran v tabeli 3.2, za plenilca pa v tabeli 3.3. Pospešku se nagon \mathbf{a}_b prišteje, ko velja $\text{energy} < cr0$.

Če ribi zmanjka energije, ta ohranja hitrost počivanja v_r in ni sposobna pospeševanja, zato bodo tudi nagoni v tem primeru zanemarljeni. Riba v takem stanju ostane, dokler njena energija ne preseže 0,05, do česar pride po 17 korakih. Poleg novih nagonov smo v namen varčevanja energije plenilcu za razliko od plena dodali še dva nova evolucijska parametra. Parameter dolžine napada ap določa največje število korakov, ki jih plenilec lahko uporabi za zasledovanje iste tarče. S tem se izognimo situacijam, v katerih plenilec svoje tarče ne bo nikoli ujel, kot se lahko to zgodi npr. pri kroženju okrog tarče. Parameter oddaljenosti od tarče, pri kateri plenilec začne z uporabo višjih hitrosti, da , pa služi temu, da plenilcu tudi v fazi napada ni potrebno ohranjati najvišje hitrosti, temveč lahko do kritične bližine tarče uporablja privzeto hitrost v_c , za katero ne potrebuje trošiti energije.

3.2 Zmedljivost plenilca med lovom (CF)

V naravi, ko se plenilec zapodi v jato, si po vsej verjetnosti redko izbere več kot eno tarčo, a svojo tarčo verjetno lahko spreminja, dokler ne pride do ulova. To smo po vzoru Zhenga in sod. [16] implementirali tako, da si plenilec ob vsakem času t naključno izbere novo tarčo v svojem območju napada. Območje napada se razteza od plenilčeve trenutne tarče do $\pm d_{\text{attack}}/2$, kjer je d_{attack} premer območja zmedljivosti plenilca v okolici njegove tarče. Izmed vseh agentov v območju je kot nova tarča naključno (z enako verjetnostjo) izbran en agent. Tarča se tako večkrat spremeni, če se agenti držijo skupaj. Glavna razlika med metodo zmedljivosti opisano v razdelku 2.3.4 in novo metodo je v tem, da pride pri prvi metodi do zmedenosti zaradi velikega števila agentov šele, ko plenilec že doseže tarčo, pri drugi pa se tarča v primeru velikega števila agentov med lovom v vsaki računani iteraciji spreminja. To posledično vpliva na zmanjšanje sposobnosti plenilca, da se osredotoča na eno samo tarčo. Tip zmedljivosti, ki ga opisujemo v tem poglavju, bomo v

Tabela 3.4: Začetne vrednosti evolucijskih parametrov sebičnega pobega.

Parameter	Vrednost	Opis
st	[1, 600]	Čas trajanja sebičnega pobega
$st1$	[0, 600]	Čas preden lahko riba ponovno sebično zbeži
sd	[0, $huntSize$]	Oddaljenost od plenilca za sebični pobeg
sp	[0, 1]	Verjetnost izbora sebičnega pobega
dp	[0, 10]	Potenca skalarnega produkta vektorjev smeri
dt	[0, 1]	Meja za vrednotenje kota med smerema

nadaljevanju naloge označevali z CF.

V primeru razpršitvene taktike novo metodo za računanje zmedljivosti uporabimo šele po opravljeni fazi razprševanja. V fazi razprševanja se plenilec namreč osredotoči na sredino jate in ne na posameznika, zato predpostavljamo, da se v tej fazi ne more zмести.

3.3 Sebični pobeg

Ko se plenilec zelo približa plenu, se plen lahko odloči za sebičen pobeg [17]. Ko je v jati, skuša plen čim bolj povečati razdaljo med jato in plenilcem, pri sebičnem pobegu pa se plen odmakne iz jate in skuša zbežati sam. Pri tem se ne ozira na preostale nagone, opisane v razdelku 2.1, ampak svojo smer spremeni tako, da je čim bolj s poti plenilcu. To smo implementirali tako, da smo za novo smer gibanja izbrali vektor pravokoten na smer gibanja plenilca. Če se plen nahaja levo od direktnega pogleda plenilca se začne premikati levo, sicer pa desno. Plen v trenutku odločitve za sebičen pobeg pospeši do svoje najvišje hitrosti, če ima za to še dovolj energije.

V model smo dodali šest novih evolucijskih parametrov, ki določajo, kdaj se bo plen odločil za sebični pobeg in če bo do te odločitve sploh prišlo. Opisani so v tabeli 3.4. Parameter st določa čas trajanja sebičnega pobega, parameter $st1$ pa določa čas po končani fazi sebičnega pobega, po poteku

katerega lahko plen ponovno izvede sebični pobeg. Parameter sd določa razdaljo med plenilcem in njegovo tarčo, znotraj katere lahko plen začne s sebičnim pobegom. Poleg tega smo izbor sebičnega pobega pogoji tudi s kotom med smerjo premikanja plenilca in plena. Do sebičnega pobega lahko pride zgolj, če je zadovoljen pogoj

$$(\cos \alpha)^{dp} > dt, \quad (3.5)$$

kjer je $\cos \alpha$ skalarni produkt med vektorjem smeri plenilca ter vektorjem smeri plena, dp potenca, ki lahko zavzame vrednosti med 0 in 10, ter nam s tem pove, kako pomemben je skalarni produkt, dt pa meja, ki jo mora levi del enačbe (3.5) preseči, da lahko plen prične s sebičnim pobegom. Tudi če je pogoj (3.5) izpolnjen in je plen znotraj sd , imamo še parameter sp , ki določa verjetnost izbora sebičnega pobega ob izpolnjenih pogojih.

3.4 Tavanje plenilca

Ko plenilcu tarča zbeži, ker se zmede, ali poteče čas plenilčevega napada ap , potem plenilec preide v fazo tavanja (*angl. wandering*) [18].

Plenilec se v fazi tavanja naključno premika po prostoru s hitrostjo v_r . Algoritem deluje tako, da si plenilec vsakih 10 do 30 sekund izbere naključno točko v prostoru in določi enotski vektor od plenilca do le-te. Za točko se nato določi ali se nahaja v smeri gibanja plenilca z uporabo skalarnega produkta. Če se, se enotski vektor v smeri proti naključni točki določi za novo smer premikanja plenilca, sicer pa se ga najprej preslika v polje pred plenilcem in nato šele določi za novo smer.

Začetne vrednosti evlucijskega parametra tavanja so prikazane v tabeli 3.5, psevdokoda pa v algoritmu 2.

Algoritem 2 Psevdokoda tavanja plenilca

```

1:  $novaSmer \leftarrow random()$ 
2:  $skalarniProdukt \leftarrow dot(plenilec.smer, novaSmer)$ 
3: if  $skalarniProdukt \leq 0$  then
4:    $novaSmer = -novaSmer$ 
5: end if

```

Tabela 3.5: Začetne vrednosti evolucijskih parametrov faze tavanja plenilca.

Parameter	Vrednost	Opis
wt	$[0, 600]$	Čas trajanja faze tavanja

Poglavje 4

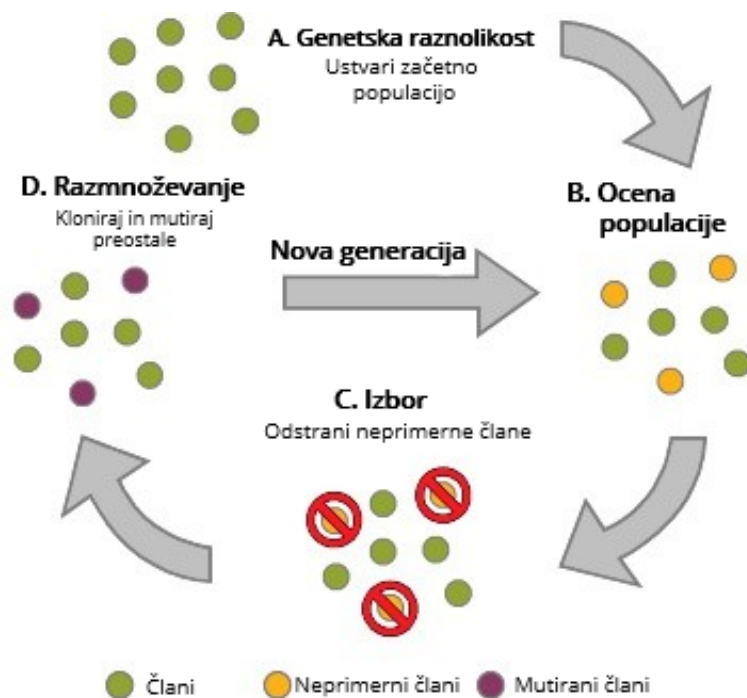
Genetski algoritem

Genetski algoritem je heuristika, ki jo je navdihnila Darwinova teorija o naravni evoluciji [19]. Sodi v večji razred evolucijskih algoritmov. Algoritem simulira proces naravne selekcije, pri kateri so v vsaki generaciji samo najboljše kandidati izbrani za razmnoževanje, tako da je naslednja generacija potomcev zgrajena iz njihovih najboljših lastnosti. Pogosto se uporablja za reševanje problemov preiskovanja in optimizacije.

Evolucija se tipično začne na populaciji naključno ustvarjenih posameznikov, od katerih je vsak definiran z množico parametrov, ki jim rečemo geni. Gre za iterativen proces, pri čemer vsaki iteraciji rečemo generacija. V vsaki generaciji, po opravljenem križanju genov posameznikov in eventuelni mutaciji križanih lastnosti, ocenimo vsakega s tem nastalega posameznika (otroka) in najboljše ocenjene izberemo za generacijo nove populacije. Izvajanje algoritma tipično zaključimo po poljubnem številu iteracij ali ko smo dovolj zadovoljni z natančnostjo rezultata (oceno najboljšega posameznika).

Tipično je genetski algoritem sestavljen iz petih faz, ki jih lahko vidimo na sliki 4.1: začetna populacija (A), opredelitev cenilke (B), izbor najboljših kandidatov (C), križanje (D) in mutacija (D).

Algoritem smo uporabili za izračun optimalnih lastnosti plenilca in plena skozi tri različne tipe poskusov, ki so se med seboj dopolnjevali. V prvem delu smo opazovali vpliv zmedljivosti plenilca pri napadu na plen brez upoštevanja



Slika 4.1: Shema delovanja genetskega algoritma. V fazi A imamo populacijo, v fazi B člane populacije ocenimo, v fazi C izberemo najboljše ocenjene in jih v fazi D reproduciramo ter tako dobimo novo populacijo. Vir slike: <https://quantdare.com/ga-to-define-a-trading-system>.

porabe energije. V drugem delu smo najboljše plenilce glede na vsakega od opazovanih tipov zmedljivosti spustili nad plen, ki smo mu v tej fazi dodali energijo in možnost sebičnega pobega, ter optimizirali evolucijske parametre plena glede na vsakega od tipov zmedljivosti. Nazadnje smo energijo dodali še plenilcu ter opazovali njegovo evolucijo pri napadu plena s parametri iz drugega dela, optimiziranimi glede na vsakega od treh tipov zmedljivosti.

4.1 Začetna populacija

Proces se začne s skupino agentov, ki ji rečemo populacija. V našem modelu je bilo to 100 plenilcev, ki so izvedli poskus napada na jato, ali 100 jat plena, nad katere smo spustili plenilca, odvisno od tega, ali nas je zanimal plenilec ali plen.

4.2 Cenilka

Cenilka nam pove, kako dober je posamezni plenilec glede na ostale plenilce. Za pridobivanje rezultatov smo uporabili tri različne cenilke:

- V primeru, da smo ocenjevali plenilca, ki ni uporabljal energije, smo za cenilko izbrali število uspešnih ulovov.
- V primeru, da smo ocenjevali plen, ki je uporabljal energijo, smo za cenilko izbrali vsoto preživelih rib glede na število opazovanih rib in povprečne preostale energije le-teh glede na najboljše povprečje v generaciji.
- V primeru, da smo ocenjevali plenilca, ki uporablja energijo, smo za cenilko izbrali vsoto števila uspešnih ulovov glede na najboljše število ulovov v generaciji, število korakov simulacije pred padcem energije na nič glede na najvišje število korakov in količino preostale energije glede na najvišjo vrednost preostale energije v generaciji.

4.3 Izbor

Ideja faze izbora je izbrati posameznike, ki so v fazi ocenjevanja dobili najvišjo oceno. Nov par staršev je izbran iz populacije za ustvarjanje vsakega od stotih članov nove populacije. Bolje ocenjeni posamezniki stare generacije imajo višjo verjetnost, da so izbrani za starše enega od potomcev.

4.4 Križanje

Križanje je najpomembnejša faza genetskega algoritma. V tej fazi simuliramo razmnoževanje staršev in ustvarimo novo generacijo potomcev, katerih geni predstavljajo gene najuspešnejših primerkov prejšnje generacije. Za vsakega od novih genov smo naključno izbrali gene enega od staršev, tako da smo simulirali met kovanca.

4.5 Mutacija

Pri generaciji potomcev lahko pride do mutacije nekaterih genov. V modelu je verjetnost mutacije 2%. Ko pride do mutacije, se vrednost mutiranega gena spremeni za določeno majhno vrednost. V primeru celega števila (čas napada) smo to vrednost nastavili na ena, pri plavajoči vejici pa na 0,2.

Poglavje 5

Rezultati

Rezultate smo pridobili z izvajanjem poskusov, ki smo jih izvedli v treh sklopih. V prvem smo izbrali najuspešnejšega plenilca (BP - razdelek 2.3.2, DP - razdelek 2.3.3) za vsakega od implementiranih tipov zmedljivosti (NC - brez zmedljivosti, CM - razdelek 2.3.4, CF - razdelek 3.2) brez porabe energije, v drugem delu smo plenu dodali energijo ter upravljanje z le-to, ter ga optimizirali glede na najuspešnejšega plenilca za vsakega od tipov zmedljivosti, v tretjem delu pa smo energijo dodali še plenilcu ter ga optimizirali glede na rezultate iz drugega dela. V vsakem od poskusov smo simulirali generacije z uporabo genetskega algoritma, opisanega v razdelku 4. V prvem sklopu smo opazovali 500 generacij, v drugem in tretjem sklopu pa smo, zaradi večjega števila evolucijskih parametrov in posledično počasnejše konvergence le-teh, opazovali 750 generacij. Vsak poskus je bil sestavljen iz 20 eksperimentov, da so bili rezultati čim manj podvrženi naključju, pa smo vsakega posameznika opazovali petkrat. V primeru, da nas je zanimala evolucija plenilca, smo vsakega posameznega plenilca spustili nad pet jat, v primeru, da nas je zanimal plen, pa smo vsako posamezno jato petkrat izpostavili napadu plenilca. Skupaj smo torej za rezultate prvega sklopa izračunali pet milijonov simulacij, za rezultate drugega in tretjega sklopa pa 7,5 milijonov simulacij. Ukvarjali smo se predvsem s tem, kako izbor različnih taktik, poraba energije in različni tipi zmedljivosti plenilca vplivajo na njegovo uspešnost. Uspešnost smo za

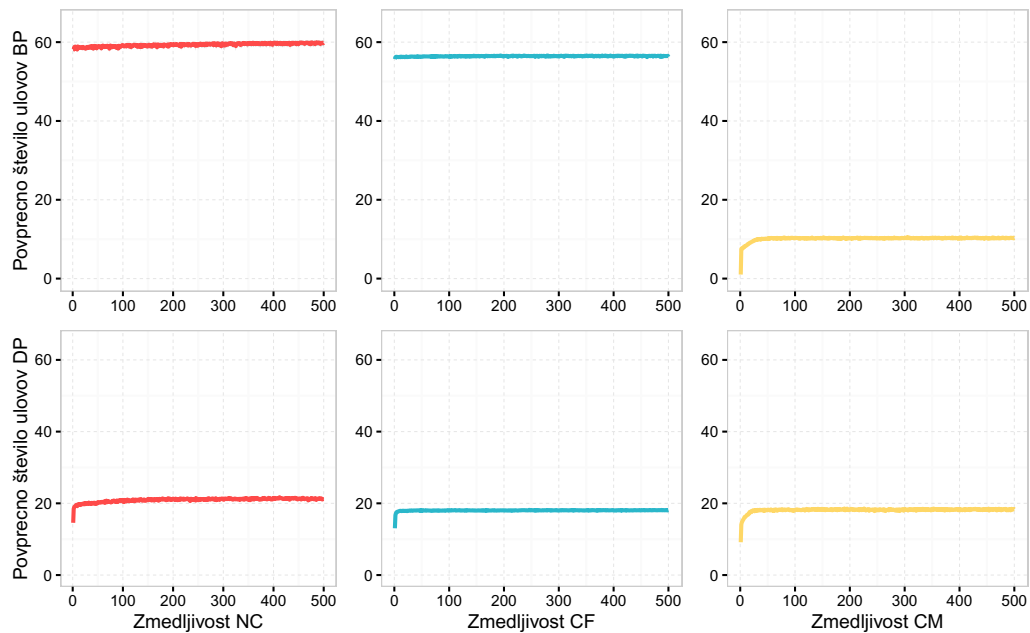
vsak sklop poskusov definirali drugače, kako smo jo računali pa je opisano v razdelku 4.2.

Poskuse smo zaganjali na računalniku s štirimi 2,60GHz 12-jedrnimi procesorji AMD Opteron 6238 in 128GB RAM-a. Za vsako generacijo je računalnik porabil 5-10s. Za simulacijo 500 generacij smo tako porabili približno 14-28h na poskus, za simulacijo 750 generacij pa 21-42h na poskus. Ker smo izvedli šest poskusov s 500 generacijami in devet poskusov s 750 generacijami, smo za pridobitev vseh rezultatov skupaj porabili 273-546h, kar je 11-22 dni.

Za statistično primerjavo porazdelitev nekaterih rezultatov smo uporabili Dunnov test, katerega ničelna hipoteza H_0 narekuje, da med opazovanimi porazdelitvami ni razlike. Ničelno hipotezo zavržemo, če je p-vrednost nižja od 0,01. Podatki, ki smo jih uporabili za Dunnov test, so obsegali rezultate 100 osebkov zadnje generacije za vseh 20 poskusov.

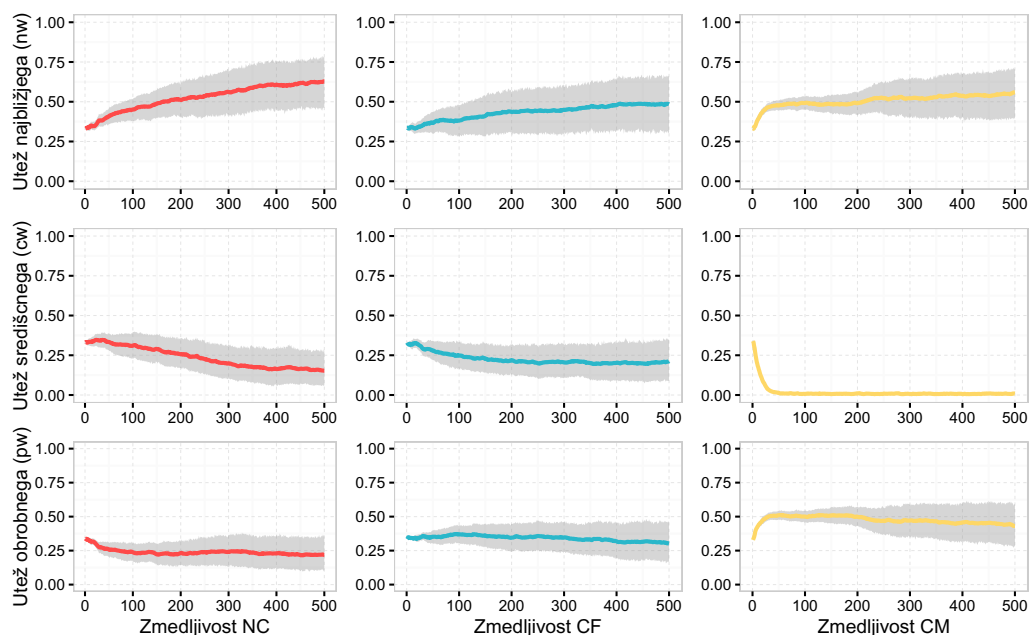
5.1 Osnovni rezultati

V prvem delu smo poustvarili rezultate opisane v osnovnem članku [13] ter jim dodali še novo metodo računanja zmedljivosti plenilca opisano v razdelku 3.2. Poskuse smo izvedli za vse tri tipe zmedljivosti (brez zmedljivosti (NC), zmedljivost ob poskusu ulova (CM), zmedljivost med lovom (CF)) in oba tipa plenilca (plenilec, ki pri napadu uporablja mešanico preprostih taktik (BP), plenilec, ki pri napadu uporablja razpršitveno taktiko (DP)). V osnovnih poskusih smo zanemarili porabo energije pri plenilcu in plenu. BP je pri svoji najvišji hitrosti lovil ribe z uporabo ene od preprostih taktik (napad najbližje tarče, napad središčne tarče, napad obrobne tarče), DP pa je jato pri svoji najvišji hitrosti najprej razpršil in si nato izbral tarčo. Za cenilko genetskega algoritma smo v tem delu izbrali zgolj število uspešnih ulovov, saj so plenilci energijo ohranjali in ni igrala pri lovu nobene vloge. Plen se v tem delu ni posluževal metode sebičnega pobega, temveč se je trudil ostati v strnjeni jati.



Slika 5.1: Slika prikazuje povprečno število uspešnih ulovov obeh vrst plenilcev za vse različne opazovane tipe zmedljivosti skozi generacije. Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM). Graf prikazuje povprečne rezultate 20 poskusov, kjer je vrednost za vsako generacijo posameznega poskusa določena kot povprečje vrednosti vseh 100 plenilcev znotraj nje. Prikazani so rezultati za 95% interval zaupanja.

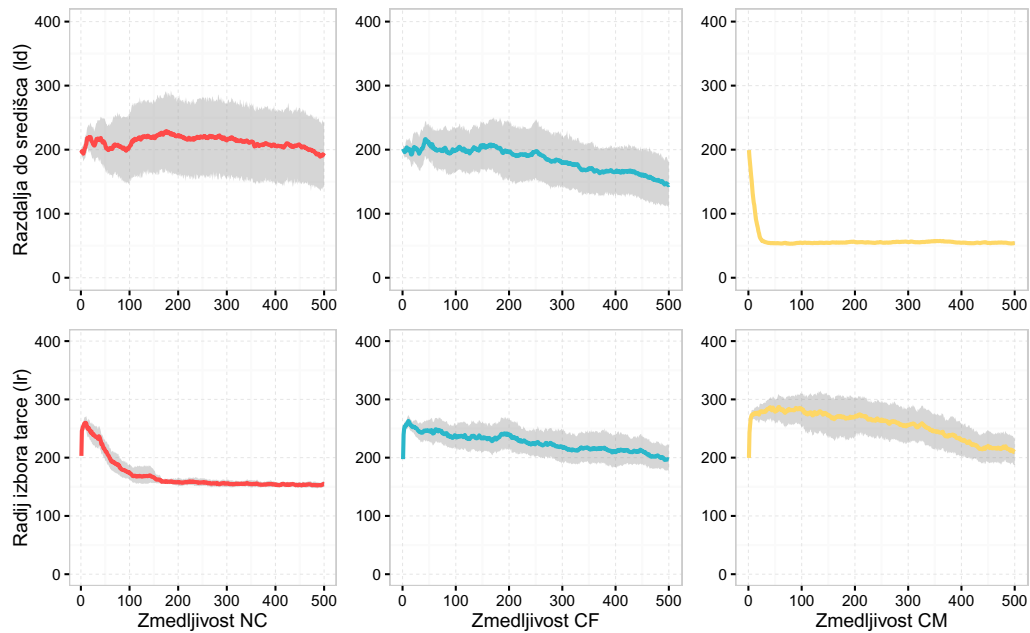
Uspešnost plenilcev za vseh šest kombinacij zmedljivosti in taktik napada je prikazana na sliki 5.1, evolucija parametrov taktik napada je prikazana na slikah 5.2 in 5.3, povprečne vrednosti parametrov ob koncu evolucije pa so zapisane v tabelah 5.1 in 5.2. Kot lahko vidimo, je DP po številu ulovov konsistenten ne glede na uporabljen tip zmedljivosti, medtem je BP uspešnejši pri metodah zmedljivosti NC in CF ter slabši pri metodi zmedljivosti CM.



Slika 5.2: Slika prikazuje evolucijo parametrov BP, ki določajo verjetnost izbora posamezne preproste taktike napada. Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM). Graf prikazuje povprečne rezultate 20 poskusov, kjer je vrednost za vsako generacijo posameznega poskusa določena kot povprečje vrednosti vseh 100 plenilcev znotraj nje. Prikazani rezultati imajo 95% interval zaupanja.

Tabela 5.1: Rezultati zadnje generacije genetskega algoritma BP. Določeni so kot povprečje povprečnih rezultatov zadnje generacije 100 plenilcev za 20 poskusov.

Zmedljivost	Št. ulovov	nw	cw	pw
Brez zmedljivosti (NC)	60	0,63	0,15	0,22
Zmedljivost med lovom (CF)	56	0,49	0,30	0,21
Zmedljivost ob poskusu ulova (CM)	10	0,56	0,01	0,43



Slika 5.3: Slika prikazuje evolucijo parametrov DP, ki določajo razdaljo od središča, pri kateri plenilec preneha z napadom (ld) in radij, znotraj katerega išče plenilec po opravljeni fazi razprševanja najbolj obrobno tarčo (lr). Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM). Graf prikazuje povprečne rezultate 20 poskusov, kjer je vrednost za vsako generacijo posameznega poskusa določena kot povprečje vrednosti vseh 100 plenilcev znotraj nje. Prikazani rezultati imajo 95% interval zaupanja.

Tabela 5.2: Rezultati zadnje generacije genetskega algoritma DP. Določeni so kot povprečje povprečnih rezultatov zadnje generacije 100 plenilcev za 20 poskusov.

Zmedljivost	Št. ulovov	lr	ld
Brez zmedljivosti (NC)	21	154,83	190,41
Zmedljivost med lovom (CF)	18	196,86	145,15
Zmedljivost ob poskusu ulova (CM)	18	209,88	54,30

5.1.1 Brez zmedljivosti (NC)

Če ne upoštevamo zmedljivosti BP zanesljivo prekaša DP. Zadnja generacija BP je povprečno ulovila 60 rib, medtem ko jih je zadnja generacija DP povprečno le 21. DP za ulov svoje tarče namreč potrebuje več časa, ker se najprej zakadi v središče jate in šele nato lovi, pri tem pa jato razbije v več podjat, najprej zaradi razprševanja in nato še zaradi ulova, te podjate pa lahko odplavajo tudi iz njegovega območja zaznavanja. Utež za izbor najbližje tarče *nw* ima od vseh uteži preprostih taktik najvišjo vrednost, saj lahko plenilec, če si vedno izbere najbližjo tarčo, skozi poskus ulovi največ le-teh. P-vrednost primerjave uteži *cw* in *pw* znaša 0,22, kar pomeni, da med njima ni statistično pomembne razlike. Povprečna razdalja *ld*, pri kateri DP preneha z razprševanjem, je višja od vseh ostalih DP v tem sklopu poskusov in ima širok interval zaupanja, saj razpršenost jate pri nezmedljivem plenilcu ni pomembna. Nasprotno ima radij iskanja obrobne tarče *lr* zelo ozek interval zaupanja, njegova povprečna vrednost pa je nižja od ostalih DP v tem sklopu, najverjetneje zato, ker je majhen *lr* primerljiv izboru najbližje tarče BP.

5.1.2 Zmedljivost ob poskusu ulova (CM)

V tej točki DP prekaša BP. Povprečno število ulovov pri DP je za 44,4% višje kot pri BP, poleg tega pa znaša znižanje števila ulovov glede na nezmedljivega plenilca pri DP zgolj 14,3%, medtem ko znaša pri BP kar 83,3%. Pri BP je verjetnost izbora središčne tarče *cw* nič, ker ima ta v svoji bližini največ ostalih agentov. Zanimivo je, da je izbor najbližje tarče *nw* bolj verjeten od izbora obrobne *pw*. Glede na nizko število ulovov predpostavljamo, da uspešnost ulova, ko je plenilec v kritični bližini tarče, ni zelo verjetna, zato je najbližja tarča boljša izbira, ker lahko plenilec hitreje ponovno poskusi z napadom. Verjetnost uspešnega ulova je neposredno odvisna od strnjenosti jate okrog tarče, ki jo plenilec izbere, zato je povprečna razdalja od središča *ld*, pri kateri DP preneha z razprševanjem jate, manjša kot pri ostalih meto-

dah zmedljivosti. Pri tem tipu zmedljivosti je namreč pomembna čim večja razpršenost jate, manjša razdalja pa pomeni daljšo fazo razprševanja. Povprečni radij izbora tarče lr je v tej točki največji, ker večji lr še dodatno poveča razpršenost jate.

5.1.3 Zmedljivost med lovom (CF)

Ko plenilec izbira novo tarčo znotraj svojega vidnega polja v vsaki iteraciji, je BP ponovno uspešnejši od DP. V primerjavi z nezmedljivim plenilcem je število ulovov ob uporabi tega tipa zmedljivosti pri BP nižje za 6,7%, pri DP pa za 14,3%. Nasprotno je pri BP uspešnost pri zmedljivosti kot stalni menjavi tarče v primerjavi z zmedljivostjo ob poskusu ulova (CM) višja za kar 460%, medtem ko ostaja povprečna uspešnost DP enaka (p-vrednost znaša 0,18). Pri BP ponovno prevladuje izbor najbližje tarče, vendar so si vsi trije parametri izbora preproste taktike po vrednosti bližje kot pri ostalih tipih zmedljivosti. Do tega je prišlo, ker so parametri v tem primeru pomembni samo za začetni izbor tarče, tarča pa se nato neodvisno menja do ulova ali izgube tarče. Razlog, da je izbor najbližje tarče še vedno najverjetnejši, je v tem, da je kljub temu, da se tarča v vsaki iteraciji zamenja, nova tarča z večjo verjetnostjo v bližini prvotne tarče določene z aktualnim parametrom izbora preproste taktike, kot v bližini tarč, ki bi jih določala ostala dva parametra. Najbližja tarča pa je najboljša izbira preprosto zato, ker pomeni krajši čas lova in posledično hitrejši ponovni poskus. Pri DP se razprševanje jate v tej točki sicer izkaže za pomembnejše kot v primeru nezmedljivosti plenilca, a je vseeno veliko manj pomembno kot pri uporabi metode zmedljivosti ob poskusu ulova (CM). Povprečna vrednost razdalje ld , pri kateri preneha z razprševanjem, se nahaja med vrednostma ld pri NC in CM, radij izbora tarče lr pa ni statistično različen od lr pri CM (p-vrednost znaša 0,49).

Tabela 5.3: Izbrani plenilci glede na vrsto zmedljivosti.

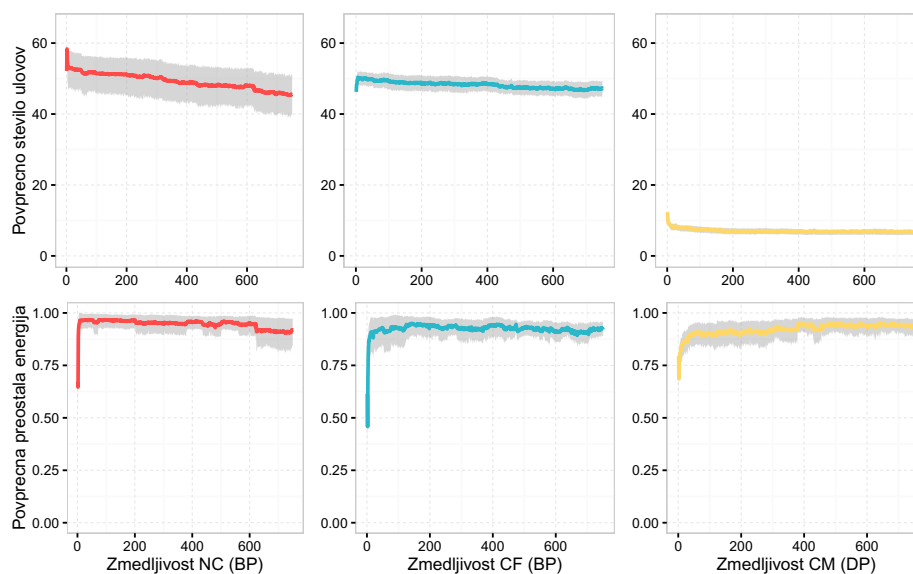
Vrsta zmedljivosti	Plenilec
Brez zmedljivosti (NC)	BP
Zmedljivost ob poskusu ulova (CM)	DP
Zmedljivost med lovom (CF)	BP

5.2 Optimizacija plena

Cilj drugega sklopa poskusov je bil določiti najboljše parametre plena za vsakega od tipov zmedljivosti plenilca. Plenu smo dodali energijo in možnost sebičnega pobega ter poiskali optimalne vrednosti njegovih parametrov za najuspešnejše plenilce glede na tip zmedljivosti iz prvega dela (razdelek 5.1). Izbira plenilca za vsako vrsto zmedljivosti je prikazana v tabeli 5.3. V tem delu parametrov plenilcev nismo spreminjali skozi evolucijo, temveč smo jih predhodno določili glede na rezultate v tabelah 5.1 in 5.2. Plenilec nima energije ter potrebe po varčevanju z le-to. Za cenilko evolucije plena smo izbrali število preživelih rib in povprečno preostalo energijo preživelih rib. Povprečno število ulovov in povprečno preostalo energijo skozi generacije lahko za vse jate plena vidimo na sliki 5.4, končne vrednosti parametrov se nahajajo v tabeli 5.4, porazdelitev vrednosti parametrov glede na nabor možnih vrednosti za vse jate plena v zadnjih generacijah je prikazana na sliki 5.5, spremembe povprečnih vrednosti parametrov skozi generacije pa so na slikah A.1-A.3.

5.2.1 Brez zmedljivosti (NC)

Plen je bil po uvedbi novih parametrov pri nezmedljivem BP v povprečju za 13,3% boljši od plena brez le-teh. Na koncu evolucije opisane v razdelku 5.1 je nezmedljiv BP v povprečju namreč ulovil 60 rib, že na začetku evolucije z novimi parametri pa le 52. Ta številka se je do konca evolucije zmanjšala še za dodatnih 11,5%, tako da se je plenilec moral na koncu zadovoljiti z le 46 ulovi.



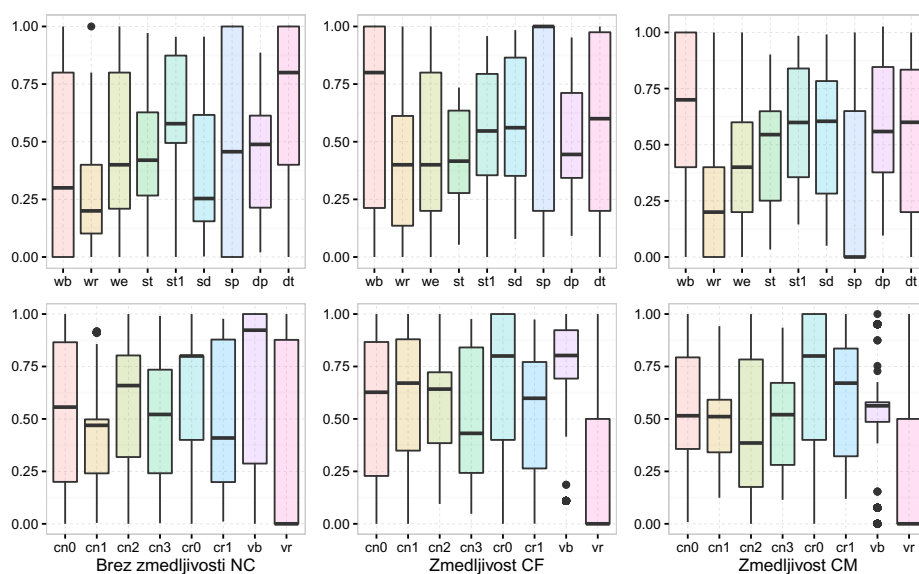
Slika 5.4: Povprečno število ulovov in povprečna preostala energija glede na vrsto zmedljivosti. Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM). Graf prikazuje rezultate 20 poskusov, kjer je vrednost za vsako generacijo posameznega poskusa določena kot povprečje vrednosti vseh 100 jat plena znotraj nje. Prikazani rezultati imajo 95% interval zaupanja.

Tabela 5.4: Rezultati evolucije plena za vse tri tipe zmedljivosti. Določeni so kot povprečje povprečnih rezultatov zadnje generacije za 20 poskusov.

Zmedljivost	Št. ulovov		Energija	
Brez zmedljivosti (NC)	46		0,92	
Zmedljivost ob poskusu ulova (CM)	7		0,93	
Zmedljivost med lovom (CF)	47		0,92	

Zmedljivost	wb	wr	we	cn0	cn1	cn2	cn3	cr0	cr1
NC	0,37	0,28	0,53	2,58	20,48	2,73	25,34	0,56	24,86
CM	0,62	0,24	0,41	2,65	24,15	2,38	25,36	0,64	30,76
CF	0,67	0,42	0,42	2,67	29,05	2,73	25,12	0,68	26,55

Zmedljivost	st	st1	sd	sp	dp	dt	vb	vr
NC	272,79	375,54	317,27	0,48	4,20	0,63	3,14	1,15
CM	280,21	350,84	428,67	0,27	5,78	0,53	2,71	1,12
CF	263,89	319,83	472,98	0,64	5,04	0,55	3,37	1,10



Slika 5.5: Porazdelitev normaliziranih vrednosti parametrov plena zadnjih generacij 20 poskusov. Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM).

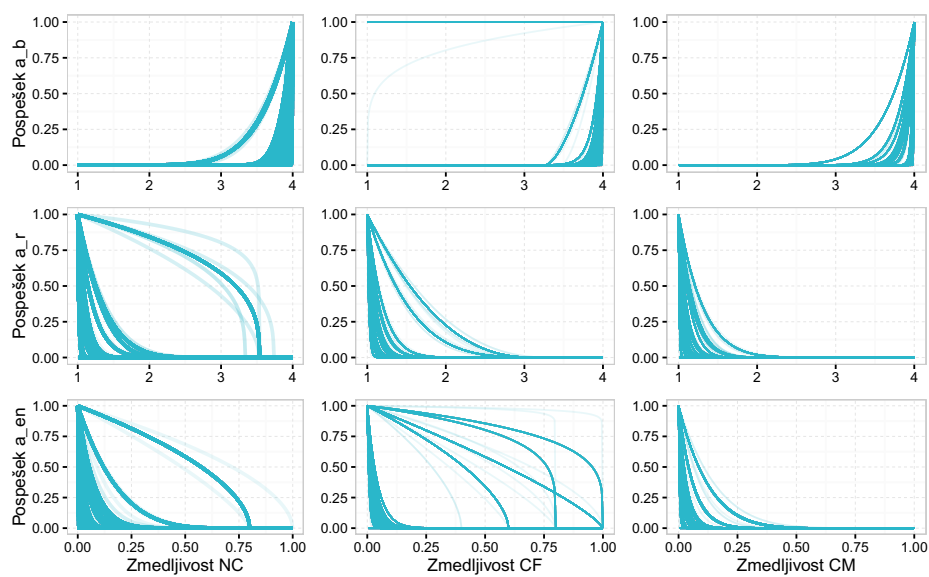
Sebični pobeg ne igra velike vloge pri pobegu, saj se verjetnost njegovega izbora sp skozi evolucijo giba okrog njegove srednje vrednosti 0,5. Izkazalo se je, da kot med smerjo plenilca in plena v tem primeru ni zelo pomemben, saj lahko glede na parametra dt in dp do sebičnega pobega pride, ko je kot med smerjo plenilca in smerjo njegove tarče manjši od 25° . Povprečna vrednost parametra dp se je skozi evolucijo znižala za 21,9%, povprečna vrednost dt pa se je povišala za 26%.

Povprečna hitrost, nad katero začne plen z upočasnjevanjem \mathbf{a}_b , znaša 2,6 BL/s, hitrost, pod katero dodatno pospešuje s pospeškom \mathbf{a}_r pa 2,7 BL/s. Hitrost v_b , s katero je plen omejen, konvergira v tej točki proti 3,13 BL/s, kar je za 21,8% nižje od najvišje hitrost v_{max} . Za 15% višja od najnižje hitrosti v_{min} je v_r , ki znaša 1,15 BL/s. Enačbe pospeškov (3.2), (3.3) in (3.4) za vse pridobljene vrednosti parametrov zadnje generacije plena so za vse možne vrednosti hitrosti in energije prikazane na sliki 5.6.

5.2.2 Zmedljivost ob poskusu ulova (CM)

Uvedba novih parametrov in nove taktike pobega plena je zmanjšala število ulovov pri napadu DP z zmedljivostjo ob poskusu ulova (CM) za 33,3% glede na rezultate iz razdelka 5.1. Število se je izboljšalo ob padcu verjetnosti sebičnega pobega sp , ki je skozi evolucijo padel za 46%, končna verjetnost sp pa je znašala 27%. Število ulovov je bilo po koncu evolucije tako za 61% nižje od števila opisanega v razdelku 5.1 in znašalo 7. Vrednosti parametrov dp in dt sta precej visoki in kažeta na to, da bo do sebičnega pobega lahko z verjetnostjo 27% prišlo le v primeru, ko bo kot, ki ga objemata vektorja smeri plenilca in njegove tarče manjši od 25° .

Povprečna hitrost, nad katero začne plen z upočasnjevanjem \mathbf{a}_b , znaša 2,65 BL/s, hitrost, pod katero dodatno pospešuje s pospeškom \mathbf{a}_r pa 2,38 BL/s. Ker verjetnost uspešnega ulova pri tej vrsti zmedljivosti nižja glede na število rib, ki se nahajajo okrog tarče, plenu ni treba plavati tako hitro, kot to počne pri ostalih dveh tipih zmedljivosti, zato je najvišja hitrost v_b , in posledično poraba energije, nižja. Hitrost v_b , s katero je plen omejen,



Slika 5.6: Slika prikazuje enačbe pospeškov a_b , a_r in a_{en} plena naučenega glede na plenilca za vse tri vrste zmedljivosti. Prikazane so vrednosti parametrov zadnje generacije 100 jat plena za 20 poskusov, skupaj 2000 jat plena. Grafa a_b in a_r prikazujeta vrednosti enačbe glede na hitrosti med $v_{min} = 1$ BL/s in $v_{max} = 4$ BL/s, graf a_{en} pa vrednosti energije med 0 in 1.

konvergira v tej točki proti 2,71 BL/s, kar je za 32,3% nižje od najvišje hitrost v_{max} . Hitrost počivanja v_r je za 12% višja od najnižje hitrosti v_{min} in znaša 1,12 BL/s. Enačbe pospeškov (3.2), (3.3) in (3.4) za vse pridobljene vrednosti parametrov zadnje generacije plena so za vse možne vrednosti hitrosti in energije prikazane na sliki 5.6.

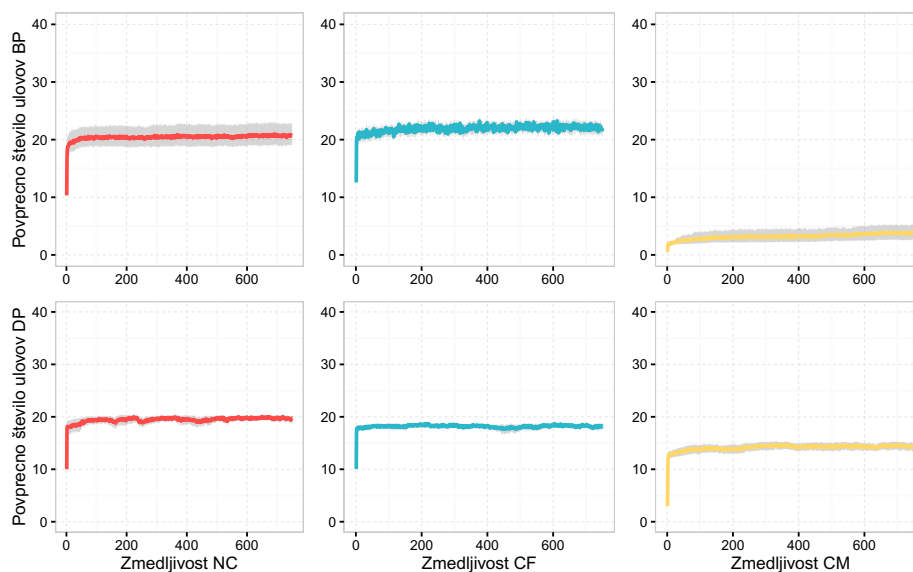
5.2.3 Zmedljivost med lovom (CF)

Podobno kot pri ostalih dveh tipih zmedljivosti se je tudi v tej točki število ulovov zmanjšalo že s samo uvedbo evolucijskih parametrov in taktike sebičnega pobega. Glede na rezultate iz razdelka 5.1 se je število ulovov najprej zmanjšalo za 17,86% in znašalo 46, do konca evolucije pa ostalo približno enako. Statistično se število ulovov ne razlikuje od števila ulovov pri BP brez zmedljivosti (p-vrednost je 0,92). Od vseh treh metod računanja zmedljivosti je sprememba števila ulovov plenilca skozi evolucijo pri tej metodi najnižja. Verjetnost sebičnega pobega sp se je skozi evolucijo povečala za 30% in je na koncu znašala 65%, kot lahko vidimo na sliki A.3. Kot med smerjo med vektorjema smeri plenilca in njegove tarče more za izbor sebičnega pobega oklepati 28° , kar je primerljivo z ostalima tipoma zmedljivosti.

Povprečna hitrost, nad katero začne plen z upočasnjevanjem \mathbf{a}_b , znaša 2,67 BL/s, hitrost, pod katero dodatno pospešuje s pospeškom \mathbf{a}_r , pa 2,73 BL/s. Hitrost v_b , s katero je plen omejen, konvergira v tej točki proti 3,37 BL/s, kar je za 15,8% nižje od najvišje hitrost v_{max} . Hitrost počivanja v_r je za 9% višja od najnižje hitrosti v_{min} in znaša 1,09 BL/s. Enačbe pospeškov (3.2), (3.3) in (3.4) za vse pridobljene vrednosti parametrov zadnje generacije plena so za vse možne vrednosti hitrosti in energije prikazane na sliki 5.6.

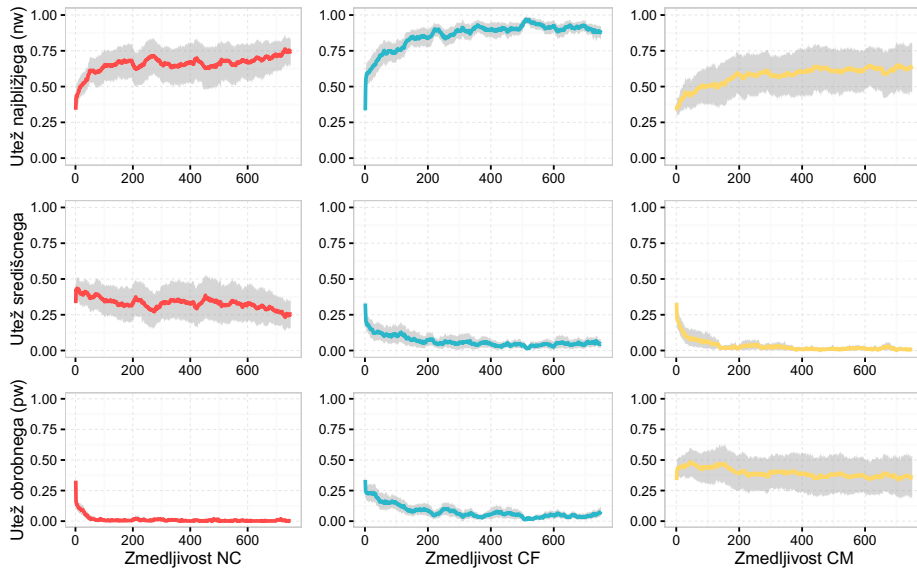
5.3 Optimizacija plenilca

V zadnjem sklopu poskusov energijo in evolucijske parametre dodali še plenilcu ter opazovali njihovo evolucijo. Za učenje plenilcev smo uporabili optimizirani plen iz razdelka 5.2, ki ima v tej točki za vsako izmed taktik določene

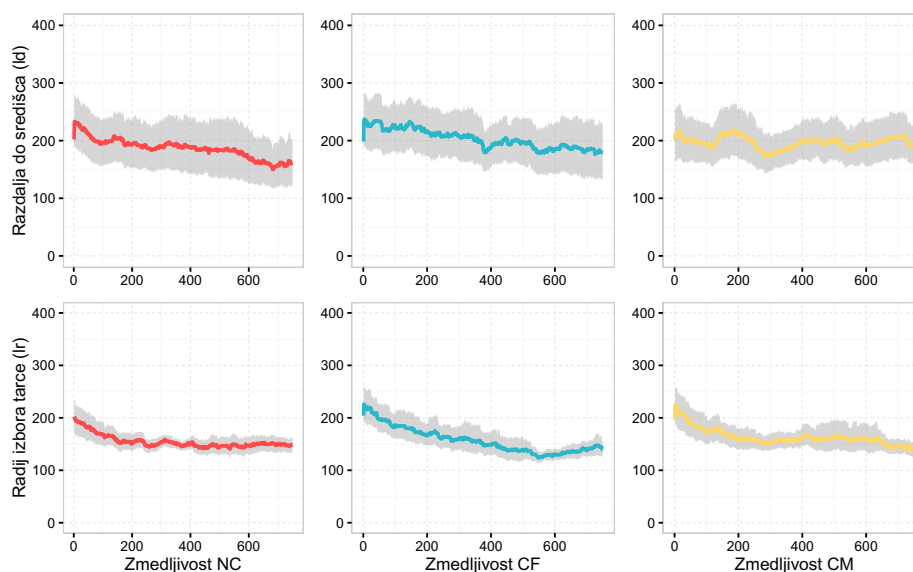


Slika 5.7: Povprečno število ulovov glede na vrsto zmedljivosti. Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM). Prikazani rezultati imajo 95% interval zaupanja.

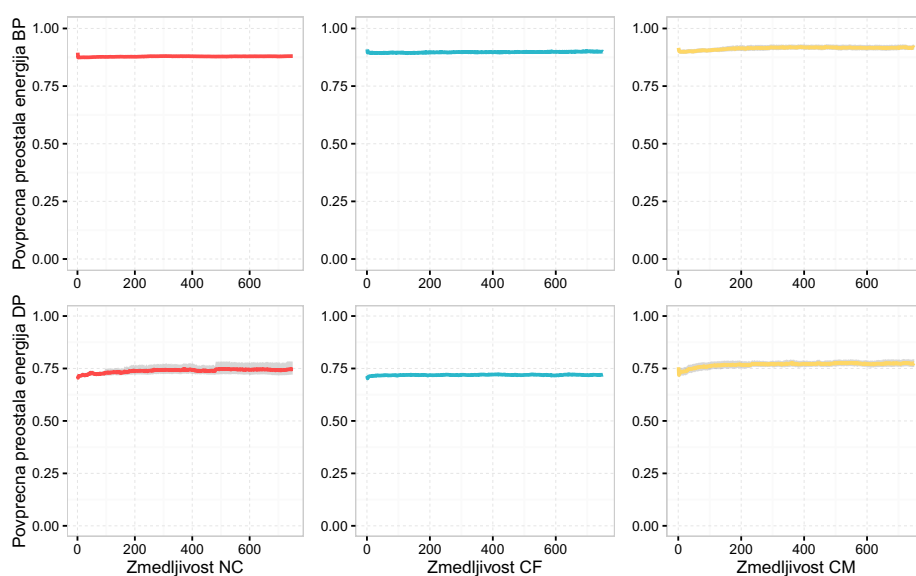
vrednosti parametrov iz tabele 5.4 in jih skozi evolucijo plenilca ne spreminjamo. Za cenilko evolucije plenilca smo uporabili vsoto števila ulovov glede na najboljšega plenilca v generaciji, preostale energije glede na najboljšega plenilca v generaciji in število korakov pred onemoglostjo plenilca glede na število možnih korakov. Če je plenilcu zmanjkalo energije smo poskus namreč predčasno zaključili in je bilo v tem primeru število korakov nižje od določenega. Opazovali smo oba tipa plenilcev (BP, DP) za vse obravnavane tipe zmedljivosti (NC, CF, CM). Število ulovov skozi generacije lahko za vse plenilce vidimo na sliki 5.7, njihovo povprečno preostalo energijo na sliki 5.8, končne vrednosti parametrov se nahajajo v tabelah 5.5 in 5.6, porazdelitev vrednosti parametrov glede na nabor možnih vrednosti za vse plenilce v zadnjih generacijah je prikazana na slikah 5.11 in 5.12, spremembe vseh vrednosti parametrov skozi generacije pa so na slikah B.1-B.6.



Slika 5.8: Slika prikazuje evolucijo parametrov BP, ki določajo verjetnost izbora posamezne preproste taktike napada. Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM). Prikazani rezultati imajo 95% interval zaupanja.



Slika 5.9: Slika prikazuje evolucijo parametrov DP, ki določajo razdaljo od središča, pri kateri plenilec preneha z napadom (ld) in radij, znotraj katerega išče plenilec po opravljeni fazi razprševanja najbolj obrobno tarčo (lr). Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM). Prikazani rezultati imajo 95% interval zaupanja.



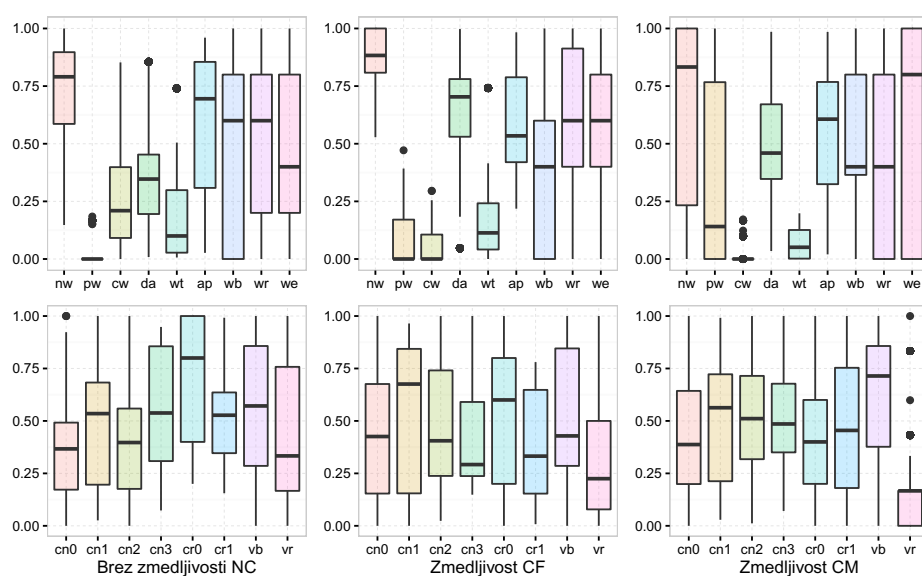
Slika 5.10: Povprečna preostala energija glede na vrsto zmedljivosti. Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM). Prikazani rezultati imajo 95% interval zaupanja.

Tabela 5.5: Rezultati evolucije plenilca BP za vse tri tipe zmedljivosti. Določeni so kot povprečje povprečnih rezultatov zadnje generacije za 20 poskusov.

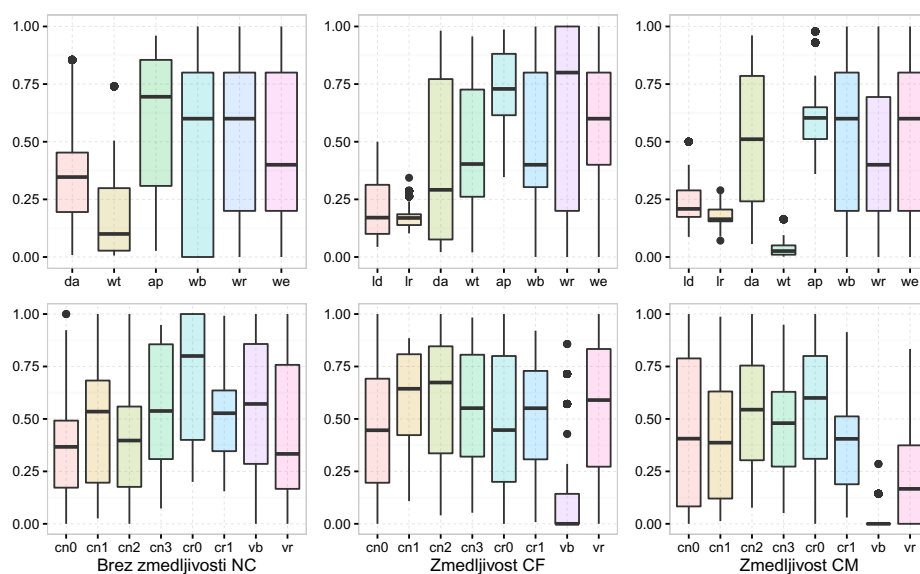
Zmedljivost	Št. ulovov		Energija	
Brez zmedljivosti (NC)	21		0,88	
Zmedljivost med lovom (CF)	21		0,90	
Zmedljivost ob poskusu ulova (CM)	4		0,92	

Zmedljivost	wb	wr	we	cn0	cn1	cn2	cn3	cr0	cr1
NC	0,49	0,53	0,45	3,95	23,77	4,05	27,85	0,68	26,18
CF	0,37	0,59	0,60	4,15	26,98	4,24	21,35	0,52	19,48
CM	0,49	0,46	0,57	4,11	24,65	4,36	24,87	0,40	24,41

Zmedljivost	nw	cw	pw	da	wt	ap	vb	vr
NC	0,74	0,25	0,02	298,05	115,47	361,65	4,99	3,49
CF	0,88	0,04	0,08	512,21	103,72	353,42	4,93	3,40
CM	0,64	0,01	0,35	389,14	41,65	335,67	5,06	3,18



Slika 5.11: Porazdelitev normaliziranih vrednosti parametrov plenilca BP zadnjih generacij 20 poskusov. Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM).



Slika 5.12: Porazdelitev normaliziranih vrednosti parametrov plenilca DP zadnjih generacij 20 poskusov. Po stolpcih lahko vidimo rezultate brez zmedljivosti (NC), rezultate za zmedljivost med lovom (CF) in rezultate za zmedljivost ob poskusu ulova (CM).

Tabela 5.6: Rezultati evolucije plenilca DP za vse tri tipe zmedljivosti. Določeni so kot povprečje povprečnih rezultatov zadnje generacije za 20 poskusov.

Zmedljivost	Št. ulovov		Energija					
Brez zmedljivosti (NC)	20		0,75					
Zmedljivost med lovom (CF)	18		0,72					
Zmedljivost ob poskusu ulova (CM)	14		0,77					

Zmedljivost	wb	wr	we	cn0	cn1	cn2	cn3	cr0	cr1
NC	0,48	0,62	0,61	4,26	22,62	4,48	25,90	0,47	21,65
CF	0,52	0,62	0,58	4,20	29,64	4,58	28,32	0,49	25,84
CM	0,53	0,43	0,54	4,16	20,26	4,38	23,92	0,51	18,74

Zmedljivost	ld	lr	da	wt	ap	vb	vr
NC	161,41	149,00	464,05	251,10	416,03	4,29	3,55
CF	179,01	139,85	326,88	282,77	437,58	4,36	3,67
CM	187,17	140,61	407,16	22,57	364,87	4,22	3,25

5.3.1 Brez zmedljivosti (NC)

Zaradi večje preglednosti smo rezultate v tem podpoglavju razdelili na dva dela. V prvem so opisani rezultati za preprostega plenilca BP, v drugem pa za razpršitvenega plenilca DP.

Preprosti plenilec (BP)

Na začetku evolucije, ko plenilcu dodamo energijo, ga spustimo nad naučen plen in so plenilčevi parametri še naključno določeni, znaša pri nezmedljivem BP povprečno število ulovov 10, kot lahko vidimo na sliki 5.7. Število se je do konca evolucije pri BP povečalo za 101,0% in je na koncu znašalo 21. Glede na to, da sta referenčna števila ulovov iz razdelkov 5.1 in 5.2 za BP znašala 60 in 46, lahko vidimo, da ima poraba energije negativen učinek na uspešnost plenilca. Plenilec, ki je ob prisotnosti enako pametnega plena plaval brez upoštevanja energije, je bil namreč 2,2-krat uspešnejši ob plenilca, ki je energijo rabil.

Kot prikazuje slika 5.9, se je za najuspešnejšo preprosto taktiko izkazal napad najbližje tarče z 74,5% verjetnostjo izbora, sledil ji je napad središčne tarče s 25,3%, verjetnost izbora napada obrobne tarče pa je znašala zgolj 0,2%. Napad najbližjega je bila najuspešnejša taktika napada tudi pri plenilcu, ki ni upošteval porabe energije, vendar je verjetnost njenega izbora znašala 11% manj. Napadu najbližjega je pri plenilcu brez upoštevanja energije sledil napad obrobne z 22% verjetnostjo izbora, medtem ko je pri BP z energijo verjetnost izbora te taktike ničelna.

Kot lahko vidimo na sliki B.1 zelo hitro konvergira trajanje faze tavanja wt , v kateri plenilec počiva, in znaša na koncu evolucije povprečno 116 iteracij. Iz tega sledi, da je počitek sicer pomemben (ob koncu evolucije bi bil lahko tudi nič), ampak ni potrebe po tem, da bi bil zelo dolg. Povprečna hitrost, nad katero začne plenilec z upočasnjevanjem \mathbf{a}_{bp} , znaša 3,95 BL/s, hitrost, pod katero dodatno pospešuje s pospeškom \mathbf{a}_{rp} pa 4,05 BL/s, kar je blizu privzeti hitrosti v_{cp} . Hitrost vb , s katero je plenilec omejen, znaša 4,99 BL/s, kar je 10,9% nižje od najvišje hitrosti v_{maxp} , hitrost počivanja vr

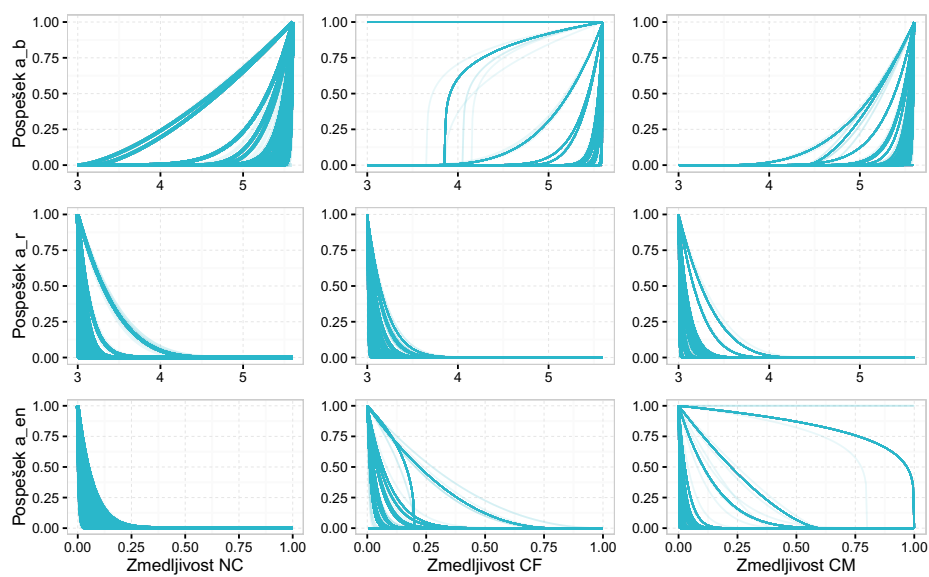
pa znaša 3,49 BL/s, kar je 16,3% višje od najnižje hitrosti v_{minp} . Enačbe pospeškov (3.2), (3.3) in (3.4) za vse pridobljene vrednosti parametrov zadnje generacije plenilcev BP so za vse možne vrednosti hitrosti in energije prikazane na sliki 5.13.

Razpršitveni plenilec (DP)

Ob naključno določenih parametrih znaša uspešnost nezmedljivega DP 10, kot lahko vidimo na sliki 5.7. Skozi evolucijo se je to število povečalo za 100% in je na koncu znašalo 20, kar je primerljivo referenčnemu številu ulovov iz razdelka 5.1, ki je znašalo 21. Iz tega sledi, da sama uvedba energije in novih parametrov negativno vpliva na uspešnost nezmedljivega DP, vendar je sposoben svoje parametre naučenemu plenu prilagoditi tako dobro, da lahko doseže primerljivo število ulovov pred in po optimizaciji energijskih parametrov plena.

Razdalja od središča, pri kateri plenilec prične z razprševanjem ld znaša po uvedbi energije 161,4 BL, kar je 15,2% manj od te vrednosti pred uvedbo energije. Radij, na katerem po končani fazi razprševanja plenilec izbere svojo tarčo znaša po uvedbi energije 149,0 BL, kar je zgolj 3,7% nižje od referenčne vrednosti pred uvedbo energije, ki je znašala 154,8 BL. Vrednosti obeh parametrov po pred in po uvedbi energije nista statistično različni.

Povprečna hitrost, nad katero začne plenilec z upočasnjevanjem \mathbf{a}_{bp} , znaša 4,26 BL/s, hitrost, pod katero dodatno pospešuje s pospeškom \mathbf{a}_{rp} pa 4,48 BL/s. Hitrost vb , s katero je plenilec omejen, znaša 4,29 BL/s, kar je 23,4% nižje od najvišje hitrosti v_{maxp} , hitrost počivanja vr pa znaša 3,55 BL/s, kar je 18,3% višje od najnižje hitrosti v_{minp} . Enačbe pospeškov (3.2), (3.3) in (3.4) za vse pridobljene vrednosti parametrov zadnje generacije plenilcev DP so za vse možne vrednosti hitrosti in energije prikazane na sliki 5.14.



Slika 5.13: Slika prikazuje enačbe pospeškov a_b , a_r in a_{en} BP za vse tri vrste zmedljivosti. Prikazane so vrednosti parametrov zadnje generacije 100 plenilcev za 20 poskusov, skupaj 2000 plenilcev. Grafa a_b in a_r prikazujeta vrednosti enačbe glede na hitrosti med $v_{minp} = 3$ BL/s in $v_{maxp} = 5,6$ BL/s, graf a_{en} pa vrednosti energije med 0 in 1.

5.3.2 Zmedljivost ob poskusu ulova (CM)

Zaradi večje preglednosti smo rezultate v tem podpoglavju razdelili na dva dela. V prvem so opisani rezultati za preprostega plenilca BP, v drugem pa za razpršitvenega plenilca DP.

Preprosti plenilec (BP)

Povprečno število ulovov za BP, ki uporablja zmedljivost ob poskusu ulova, znaša takoj po dodani energiji z naključno določenimi vrednostmi parametrov povprečno 1, ta vrednost pa se do konca evolucije dvigne na 4. Število ulovov je za 60% nižje od referenčne vrednosti iz razdelka 5.1, zaradi česar lahko ponovno sklepamo, da je evolucija plena res bolj odvisna od vrste zmedljivosti plenilca kot njegove taktike napada, saj je plen uspešen tudi ob napadu vrste plenilca, ki je nismo uporabili za njegovo evolucijo.

Na sliki 5.9 lahko vidimo, da je verjetnost izbora preproste taktike napada podobna kot pri referenčnih vrednostih iz razdelka 5.1 razklana med napadom najbližje tarče s 64% verjetnostjo izbora in napadom obrobne tarče s 36% verjetnostjo izbora, kar je smiselno, saj bo imela središčna tarča okrog sebe največ sosedov, ki plenilca zmedejo, medtem ko jih bosta imeli najbližja in obrobna tarča manj, pri čemer napad najbližjega prevladuje, ker pomeni hitrejši doseg tarče in posledično več poskusov napada znotraj časovnega okvirja. Napad središčne tarče je pri tej vrsti zmedljivosti nesmiseln in verjetnost njegovega izbora znaša 1% tako pri plenilcu brez upoštevanja energije kot tudi plenilcu, ki energijo upošteva.

Čas tavanja wt je pri tem plenilcu, od vseh šest obravnavanih kombinacij, najnižji in znaša zgolj 42 iteracij, saj se plenilec velikokrat zmede in preide v fazo tavanja. Kljub kratkemu času tavanja, ki pomeni počitek, je v tej fazi tolikokrat, da je njegova končna povprečna preostala energija podobna kot pri drugih dveh vrstah zmedljivosti. Povprečna hitrost, nad katero začne plenilec z upočasnjevanjem \mathbf{a}_{bp} , znaša 4,04 BL/s, hitrost, pod katero dodatno pospešuje s pospeškom \mathbf{a}_{rp} pa 4,00 BL/s. Hitrost vb , s katero je plenilec omejen, znaša 5,06 BL/s, kar je 9,6% nižje od najvišje hitrosti v_{maxp} , hitrost

počivanja vr pa znaša 3,18 BL/s, kar je 6% višje od najnižje hitrosti v_{minp} . Enačbe pospeškov (3.2), (3.3) in (3.4) za vse pridobljene vrednosti parametrov zadnje generacije plenilcev BP so za vse možne vrednosti hitrosti in energije prikazane na sliki 5.13.

Razpršitveni plenilec (DP)

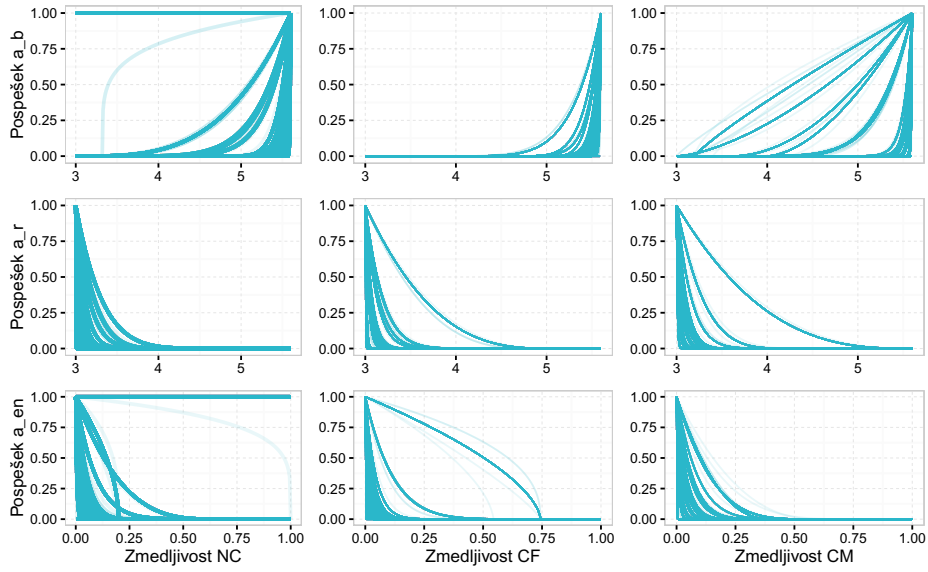
Povprečno število ulovov za DP, ki uporablja zmedljivost ob poskusu ulova, v prvih generacijah v tem delu znaša povprečno 3. Skozi evolucijo je ta vrednost narasla za 366,7% in je na koncu znašala 14, kar je 28,5% manj od referenčne vrednosti iz razdelka 5.1, ki je znašala 18. Trajanje tavanja plenilca wt je tudi pri DP zelo nizko, a vseeno za 125% višje kot pri BP, ker je uspešnejši in preide v fazo tavanja zato redkeje. Povprečna ohranjena energija plenilcev skozi generacije vseeno raste, kar lahko vidimo na sliki 5.8.

Razdalja od središča, pri kateri plenilec prične z razprševanjem ld znaša po uvedbi energije 187,2 BL, kar je 245% višje od referenčne vrednosti pred uvedbo energije. Radij, na katerem po končani fazi razprševanja plenilec izbere svojo tarčo znaša po uvedbi energije 140,6 BL, kar je 33% nižje od referenčne vrednosti pred uvedbo energije, ki je znašala 209,9 BL.

Povprečna hitrost, nad katero začne plenilec z upočasnjevanjem \mathbf{a}_{bp} , znaša 4,16 BL/s, hitrost, pod katero dodatno pospešuje s pospeškom \mathbf{a}_{rp} pa 4,38 BL/s. Hitrost vb , s katero je plenilec omejen, znaša 4,22 BL/s, kar je 24,6% nižje od najvišje hitrosti v_{maxp} , hitrost počivanja vr pa znaša 3,25 BL/s, kar je 8,3% višje od najnižje hitrosti v_{minp} . Enačbe pospeškov (3.2), (3.3) in (3.4) za vse pridobljene vrednosti parametrov zadnje generacije plenilcev DP so za vse možne vrednosti hitrosti in energije prikazane na sliki 5.14.

5.3.3 Zmedljivost med lovom (CF)

Zaradi večje preglednosti smo rezultate v tem podpoglavju razdelili na dva dela. V prvem so opisani rezultati za preprostega plenilca BP, v drugem pa za razpršitvenega plenilca DP.



Slika 5.14: Slika prikazuje enačbe pospeškov a_b , a_r in a_{en} DP za vse tri vrste zmedljivosti. Prikazane so vrednosti parametrov zadnje generacije 100 plenilcev za 20 poskusov, skupaj 2000 plenilcev. Grafa a_b in a_r prikazujeta vrednosti enačbe glede na hitrosti med $v_{minp} = 3$ BL/s in $v_{maxp} = 5,6$ BL/s, graf a_{en} pa vrednosti energije med 0 in 1.

Preprosti plenilec (BP)

Uvedba energije ni koristila nobenemu od plenilcev in BP z zmedljivostjo med lovom ni bil nobena izjema. Povprečje ulovov v prvi iteraciji je znašalo 13, skozi evolucijo pa je vrednost narasla na 21. S tem se je plenilec izkazal za najuspešnejšega od vseh tako ob uvedbi, kot ob koncu evolucije, saj je znašala porast števila ulovov zgolj 61,5%.

Tako kot v prvem sklopu poskusov (razdelek 5.1) je najuspešnejša preprosta taktika napad najbližje tarče, katere prevlada nad drugima preprostima taktikama je z 88% verjetnostjo izbora precej bolj razvidna od plenilca brez upoštevanja energije, pri katerem znaša verjetnost izbora najbližje tarče 0,49%, verjetnost izbora središčne tarče 30%, verjetnost izbora obrobne tarče pa 21%.

Parameter dolžine tavanja wt statistično ni različen od dolžine tavanja pri nezmedljivem BP (p-vrednost je 0,82) in znaša 104 iteracije. Povprečna hitrost, nad katero začne plenilec z upočasnjevanjem \mathbf{a}_{bp} , znaša 4,15 BL/s, hitrost, pod katero dodatno pospešuje s pospeškom \mathbf{a}_{rp} pa 4,24 BL/s. Imamo torej interval med hitrostjo 4,15 in 4,24 BL/s, znotraj katerega plenilec hkrati pospešuje in upočasnjuje. Hitrost vb , s katero je plenilec omejen, konvergira v tej točki proti 4,93 BL/s, kar je za 12% nižje od najvišje hitrosti v_{maxp} . Hitrost počivanja v_r je za 13,3% višja od najnižje hitrosti v_{minp} in znaša 3,40 BL/s. Enačbe pospeškov (3.2), (3.3) in (3.4) za vse pridobljene vrednosti parametrov zadnje generacije plenilcev BP so za vse možne vrednosti hitrosti in energije prikazane na sliki 5.13.

Razpršitveni plenilec (DP)

Povprečno število ulovov na začetku evolucije je pri DP znašalo 10 in do njenega konca naraslo za 80% ter znašalo 18, kar je statistično podobno referenčnim rezultatom iz razdelka 5.1 (p-vrednost znaša 0,16). DP z zmedljivostjo med lovom (CF) je tako edini od plenilcev, ki mu je kljub pametnemu plenu skozi evolucijo energijskih parametrov uspelo ohraniti število ulovov glede na referenčnega plenilca brez energije. Sklepamo, da je do tega prišlo,

ker je bil plen pri tej zmedljivosti naučen glede na BP in ne DP, poleg tega pa se je že v razdelku 5.2 izkazalo, da se je plenu najtežje prilagoditi na tip zmedljivosti CF in je bil pri njeni uporabi najmanj uspešen.

Razdalja od središča, pri kateri plenilec prične z razprševanjem ld znaša po uvedbi energije 179,1 BL, kar je 23,4% višje od referenčne vrednosti pred uvedbo energije. Radij, na katerem po končani fazi razprševanja plenilec izbere svojo tarčo znaša po uvedbi energije 139,8 BL, kar je 29% nižje od referenčne vrednosti pred uvedbo energije, ki je znašala 196,9 BL.

Povprečna hitrost, nad katero začne plenilec z upočasnjevanjem \mathbf{a}_{bp} , znaša 4,20 BL/s, hitrost, pod katero dodatno pospešuje s pospeškom \mathbf{a}_{rp} pa 4,58 BL/s. Imamo torej interval med hitrostjo 4,20 in 4,58 BL/s, znotraj katerega plenilec hkrati pospešuje in upočasnjuje. Hitrost vb , s katero je plenilec omejen, konvergira v tej točki proti 4,36 BL/s, kar je za 22,1% nižje od najvišje hitrost v_{maxp} . Hitrost počivanja v_r je za 22,3% višja od najnižje hitrosti v_{minp} in znaša 3,67 BL/s. Enačbe pospeškov (3.2), (3.3) in (3.4) za vse pridobljene vrednosti parametrov zadnje generacije plenilcev DP so za vse možne vrednosti hitrosti in energije prikazane na sliki 5.14.

5.4 Vrednotenje rezultatov

Skozi tri sklope poskusov, katerih rezultati so podrobno opisani v razdelkih 5.1, 5.2 in 5.3, smo opazovali evolucijo plenilca in plena glede na vsako od treh različnih implementiranih tipov zmedljivosti plenilca. Glede na rezultate iz 5.1 smo za evolucijo plena izbrali za nezmedljivo metodo BP, za metodo zmedljivosti ob poskusu ulova DP, za zmedljivost med lovom pa ponovno BP. Tudi po končnih rezultatih sta metoda nezmedljivosti in metoda zmedljivosti kot stalne menjave tarče najbolj primerljivi, medtem ko da metoda zmedljivosti ob poskusu ulova (CM) navadno precej drugačne rezultate.

5.4.1 Plen

Genetski algoritem za plen smo uporabili le enkrat in sicer glede na najboljše plenilce za vsako od različnih metod računanja zmedljivosti, ki niso uporabljali varčevanja z energijo. Kot lahko razberemo iz grafa 5.4 se rezultati vidno razlikujejo glede na uporabljen metodo zmedljivosti. Pri nezmedljivem plenilcu je interval zaupanja zelo širok, kar pomeni, da za uspešnost ni točno določenega pravila. Uspeh je pri tej metodi tudi najbolj odvisen od porabe energije, za katero lahko vidimo, da ima naklon padca najvišji, končno vrednost energije pa najnižjo. Padec energije lahko vidimo tudi pri metodi stalne menjave tarče, čeprav je ta manjši, plen pa je pri pobegu tu od vseh najmanj uspešen. Nasprotno pri zmedljivosti ob poskusu ulova (CM) energija skozi evolucijo narašča, končna vrednost je najvišja, število ulovov pa zelo hitro konvergira in ostaja skozi evolucijo zelo nizko. Končne vrednosti parametrov so zapisane v tabeli 5.4.

Glavno razliko med vsemi tremi vrstami optimiziranega plena predstavlja verjetnost izbora taktike sebičnega pobega *sp*. Pri BP je povprečna verjetnost sebičnega pobega okrog 50-65%, pri DP pa samo 27%, vrednosti *dp* in *dt*, ki določata kot med plenilcem in plenom, pa pri vseh treh vrstah zmedljivosti določata kot približno 25°. Pri zmedljivosti ob poskusu ulova (CM), ki je bila prisotna pri DP, je namreč za plen veliko bolje, če se drži skupaj, saj je zmedljivost neposredno določena s številom rib v okolici tarče. Sebični pobeg je zato nesmiseln, saj je verjetnost preživetja zaradi le-tega manjša od verjetnosti zmedenosti plenilca, če je okoli tarče dovolj rib. Zaradi tega je najvišja hitrost plena *vb* pri DP najnižja in preostala energija, katere poraba je odvisna od hitrosti, najvišja. Plen bi lahko plaval tudi z v_{min} in bi bil plenilec še vedno neuspešen, če bi se v bližini tarče nahajalo veliko drugih rib.

5.4.2 Plenilec

Genetski algoritem za evolucijo plenilca smo uporabili dvakrat. Najprej smo določili najuspešnejšo vrsto plenilca (BP ali DP) glede na vsakega od obravnavanih tipov zmedljivost ter optimalne vrednosti parametrov njihovih taktik napada. V prvem sklopu poskusov je bil BP zanesljivo uspešnejši od DP pri nezmedljivem plenilcu (NC) in plenilcu z zmedljivostjo med lovom (CF), vendar je v primerjavi z njima popolnoma pogorel pri zmedljivosti ob poskusu ulova (CM), medtem ko so bili rezultati DP primerljivi za vse tri uporabljene metode zmedljivosti, kot lahko vidimo na sliki 5.1. V zadnjem sklopu poskusov, ko smo plenilcu dodali energijo, je bilo končno število ulovov pri BP in DP primerljivo pri metodah zmedljivosti NC in CF. Slabše sta se BP in DP odrezala pri metodi zmedljivosti CM, pri čemer je bil DP za več kot 200% boljši od BP. Iz tega sledi, da je DP veliko boljši pri spopadanju z zmedljivostjo, porabo energije in lovom pametnega plena kot BP.

Za najuspešnejšo preprosto taktiko napada se je v vseh šestih poskusih, ki smo jih izvedli z BP, izkazala taktika izbora najbližje tarče, saj ta pomeni najhitreje izveden napad in posledično večje število poskusov ulovov v opazovanem časovnem in intervalu. Glavno razliko med plenilcem pred in po uvedbi energije vidimo v tem, da se verjetnost izbora najbližje tarče pred uvedbo energije giba med 49-64%, po uvedbi energije pa med 64-88%, kar kaže na to, da je izbor najbližje tarče po uvedbi energije še veliko bolj pomemben.

Zanimivo je, da sta parametra razpršitvene taktike pri DP brez upoštevanja energije za vse tri metode zmedljivosti statistično različna, po uvedbi energije, pa statistične razlike med njima ni več. Razdalja, pri kateri DP začne z razprševanjem ld , tako po uvedbi energije nima statističnih razlik pri NC, CM in CF, isto pa velja tudi za radij iskanja tarče lr . Statističnih razlik nismo opazili tudi pri večini energijskih parametrov (ap , $cn0$, $cn1$, $cn2$, $cr0$, $cr1$, vb , wb in we), kar kaže na to, da je uspešnost razpršitvene taktike napada manj odvisna od vrste zmedljivosti plenilca.

Poglavje 6

Sklep

Cilj magistrske naloge je bila analiza vpliva energije na simulacije v računalniškem modelu plenilec-plen. Implementirali smo metodo računanja energije ter jo dodali tako plenilcu kot plenu, do rezultatov pa smo prišli z uporabo genetskega algoritma. Ugotovili smo, da je število ulovov plenilca ob uporabi implementirane metode porabe energije manjše ali enako, saj plenilec za svoj napad neprestano porablja energijo, se trudi varčevati z le-to in svojo hitrost temu primerno spreminja. Pri plenu energijo trošijo zgolj posamezniki v kritični bližini plenilca, medtem ko ostali plavajo v jati z nizko hitrostjo in energijo regenerirajo. Izkazalo se je, da je plenilec veliko bolj uspešen, če do visokih hitrosti pospeši le, ko je v kritični bližini svoje tarče. V nasprotnem primeru je bolje, da plava počasneje in s tem privarčuje nekaj energije.

Rezultate smo pridobili skozi tri sklope poskusov, katerih končno število ulovov prikazuje tabela 6.1. Kot lahko vidimo sta oba BP v osnovnem modelu brez energije veliko uspešnejša od DP, nato pa število njunih ulovov skozi poskuse pada. BP brez zmedljivosti in brez energije je bil za 23,3% manj uspešen pri uporabi pametnega plena, BP z zmedljivostjo med lovom (CF) 16,1% manj uspešen, DP pa 61,1% manj uspešen. Ob dodani porabi energije in optimizaciji energijskih parametrov plenilca je bil BP pri vseh metodah zmedljivosti vsaj 50% slabši od rezultatov iz prejšnjih sklopov poskusov, DP pa v večini primerov primerljiv z rezultati osnovnega modela. Iz tega sledi,

Tabela 6.1: Povprečno število ulovov plenilca na koncu vseh treh sklopov poskusov.

Zmedljivost	1	2	3
BP brez zmedljivosti (NC)	60	46	21
BP z zmedljivostjo med lovom (CF)	56	47	21
BP z zmedljivostjo ob poskusu ulova (CM)	10	/	4
DP brez zmedljivosti (NC)	21	/	20
DP z zmedljivostjo med lovom (CF)	18	/	18
DP z zmedljivostjo ob poskusu ulova (CM)	18	7	14

da je DP veliko bolj sposoben izkoristiti energijo in energijske parametre v svoj prid kot BP. Za najuspešnejša po končnem številu ulovov sta se kljub velikemu padcu števila le-teh skozi poskuse izkazala nezmedljiv BP in BP z zmedljivostjo med lovom (CF). Zanimivo je, da so kljub veliki prednosti BP v prvem delu poskusov, rezultati v zadnjem delu poskusov primerljivi z DP. Za po številu ulovov najnižji tip zmedljivosti se je tako za BP kot DP izkazala zmedljivost ob poskusu ulova (CF), saj se temu tipu plen najlažje prilagodi, plenilec pa najtežje.

Dokazali smo, da ima vpliv energije ter parametri, povezani s porabo le-te, velik vpliv na uspešnost plenilca in plena, ne glede na opazovano taktiko napada in metodo zmedljivosti. Izkazalo se je, da je najuspešnejša preprosta taktika napada izbor najbližje tarče, po uvedbi energije pa se je izkazalo, da so vrednosti parametrov razpršitvene taktike primerljive za vse tri obravnavane tipe zmedljivosti plenilca.

Literatura

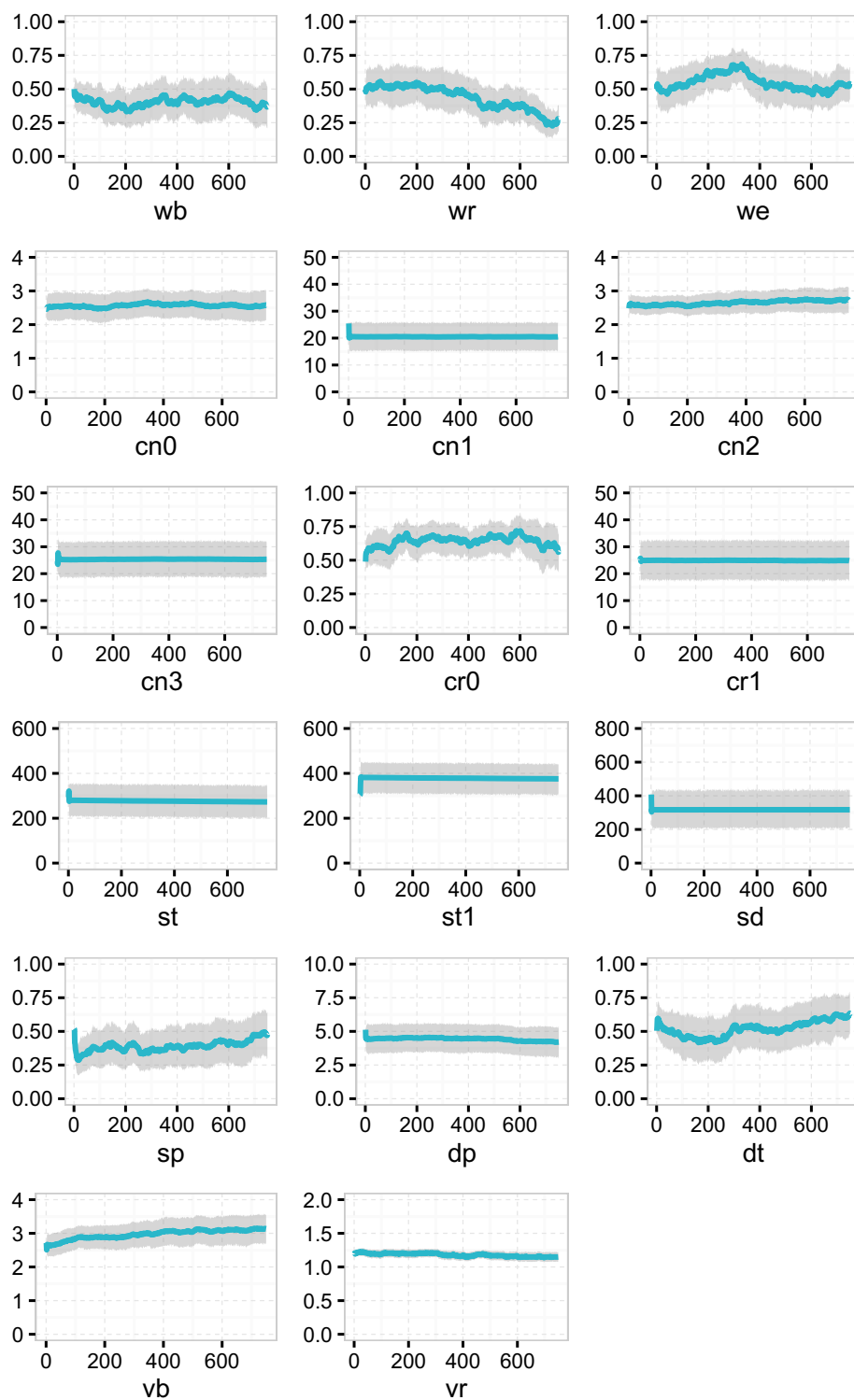
- [1] T. Vicsek, A. Zafeiris, Collective motion, *Physics Reports* 517 (3) (2012) 71 – 140. doi:10.1016/j.physrep.2012.03.004.
- [2] B. L. Partridge, Internal dynamics and the interrelations of fish in schools, *J. Comp. Physiol* 144 (1981) 313 – 325. doi:10.1007/BF00612563.
- [3] B. L. Partridge, The structure and function of fish schools, *Scientific American* 246 (6) (1982) 114 – 123. doi:10.1038/scientificamerican0682-114.
- [4] D. Pavlov, A. Kasumyan, Patterns and mechanisms of schooling behavior in fish: A review, *Journal of Ichthyology* 40 (2000) S163–S231.
- [5] S. I. Nishimura, A predator’s selection of an individual prey from a group, *Biosystems* 65 (1) (2002) 25 – 35. doi:10.1016/S0303-2647(01)00191-5.
- [6] M. Larsson, Why do fish school?, *Current Zoology* 58 (1) (2012) 116–128. doi:10.1093/czoolo/58.1.116.
- [7] B. L. Partridge, Evidence against a hydrodynamic function for fish schools, *Nature* 279 (1979) 418. doi:10.1038/279418a0.
- [8] C. Hemelrijk, D. Reid, H. Hildenbrandt, J. Padding, The increased efficiency of fish swimming in a school, *Fish and Fisheries* 16 (3) (2014) 511–521. doi:10.1111/faf.12072.

-
- [9] J. R. Krebs, N. B. Davies, Behavioural ecology: an evolutionary approach, Oxford: Blackwell Science Ltd, 1997.
- [10] H. Kunz, T. Züblin, C. K. Hemelrijk, On prey grouping and predator confusion in artificial fish schools, in: Proceedings of the Tenth International Conference of Artificial Life. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2006.
- [11] R. S. Olson, A. Hintze, F. C. Dyer, D. B. Knoester, C. Adami, Predator confusion is sufficient to evolve swarming behaviour, *Journal of The Royal Society Interface* 10 (85) (2013) 20130305. doi:10.1098/rsif.2013.0305.
- [12] R. S. Olson, D. B. Knoester, C. Adami, Evolution of swarming behavior is shaped by how predators attack, *Artificial Life* 22 (2016) 299–318. doi:10.1162/ARTL_a_00206.
- [13] J. Demšar, C. K. Hemelrijk, H. Hildenbrandt, I. Lebar Bajec, Simulating predator attacks on schools: Evolving composite tactics, *Ecological Modelling* 304 (2015) 22 – 33. doi:10.1016/j.ecolmodel.2015.02.018.
- [14] J. Demšar, Štrumbelj Erik, I. Lebar Bajec, A balanced mixture of antagonistic pressures promotes the evolution of parallel movement, *Scientific Reports* 6 (2016) 39428. doi:10.1038/srep39428.
- [15] H. Kunz, C. K. Hemelrijk, Simulations of the social organization of large schools of fish whose perception is obstructed, *Applied Animal Behaviour Science* 138 (3) (2012) 142 – 151, special Issue: Living In Large Groups. doi:10.1016/j.applanim.2012.02.002.
- [16] M. Zheng, Y. Kashimori, O. Hoshino, K. Fujita, T. Kambara, Behavior pattern (innate action) of individuals in fish schools generating efficient collective evasion from predation, *Journal of Theoretical Biology* 235 (2) (2005) 153 – 167. doi:10.1016/j.jtbi.2004.12.025.

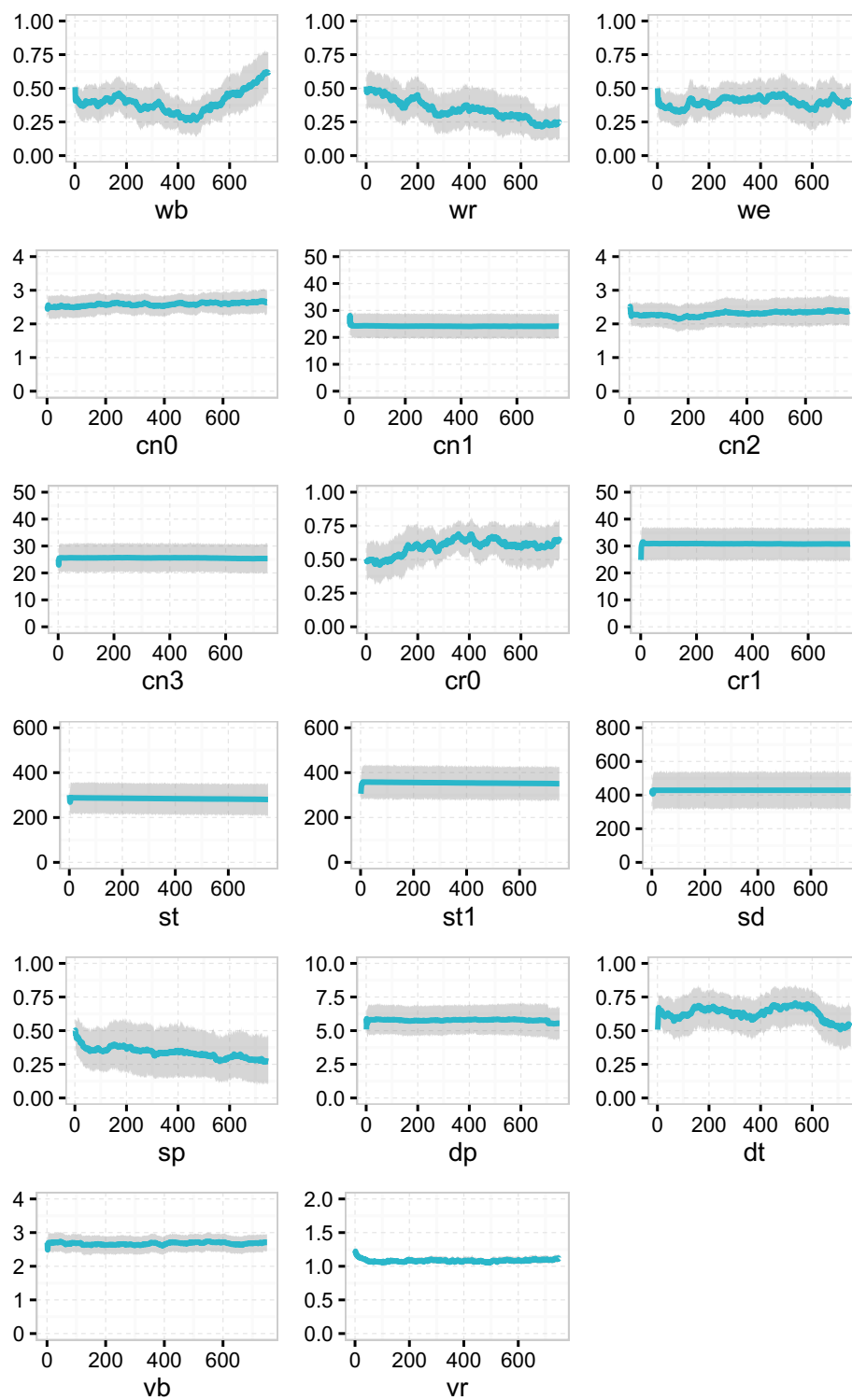
-
- [17] P. Domenici, R. Batty, Escape behavior of solitary herring (*clupea harengus*) and comparisons with schooling individuals, *Marine Biol* 128 (1997) 29 – 38. doi:10.1007/s002270050065.
- [18] F. Bevilacqua, Understanding steering behaviors: Wander (2012).
URL <https://gamedevelopment.tutsplus.com/tutorials/understanding-steering-behaviors-wander--gamedev-1624>
- [19] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.

Dodatek A

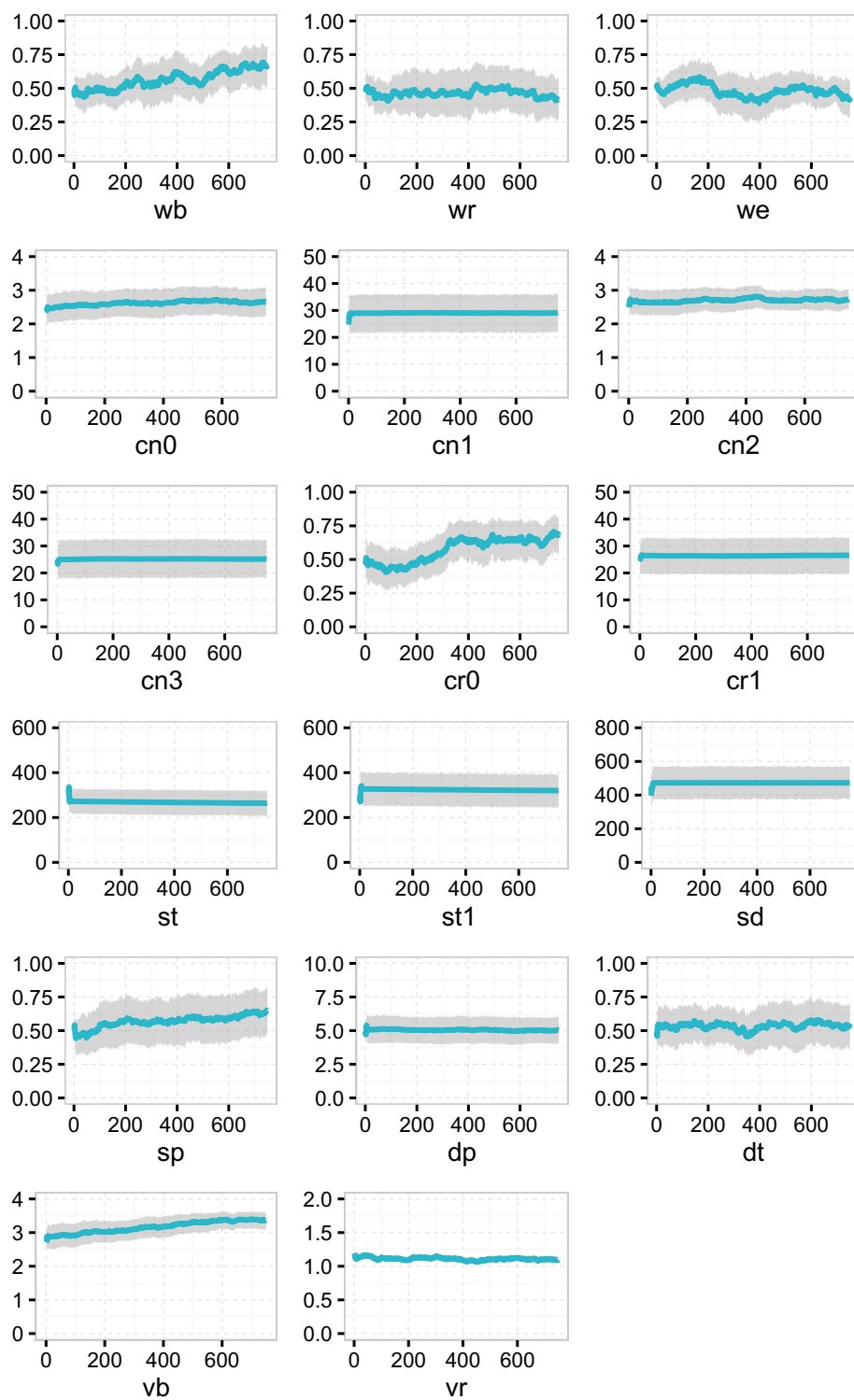
Grafi evolucije energijskih parametров plena



Slika A.1: Evolucija parametrov plena za nezmedljivega BP.



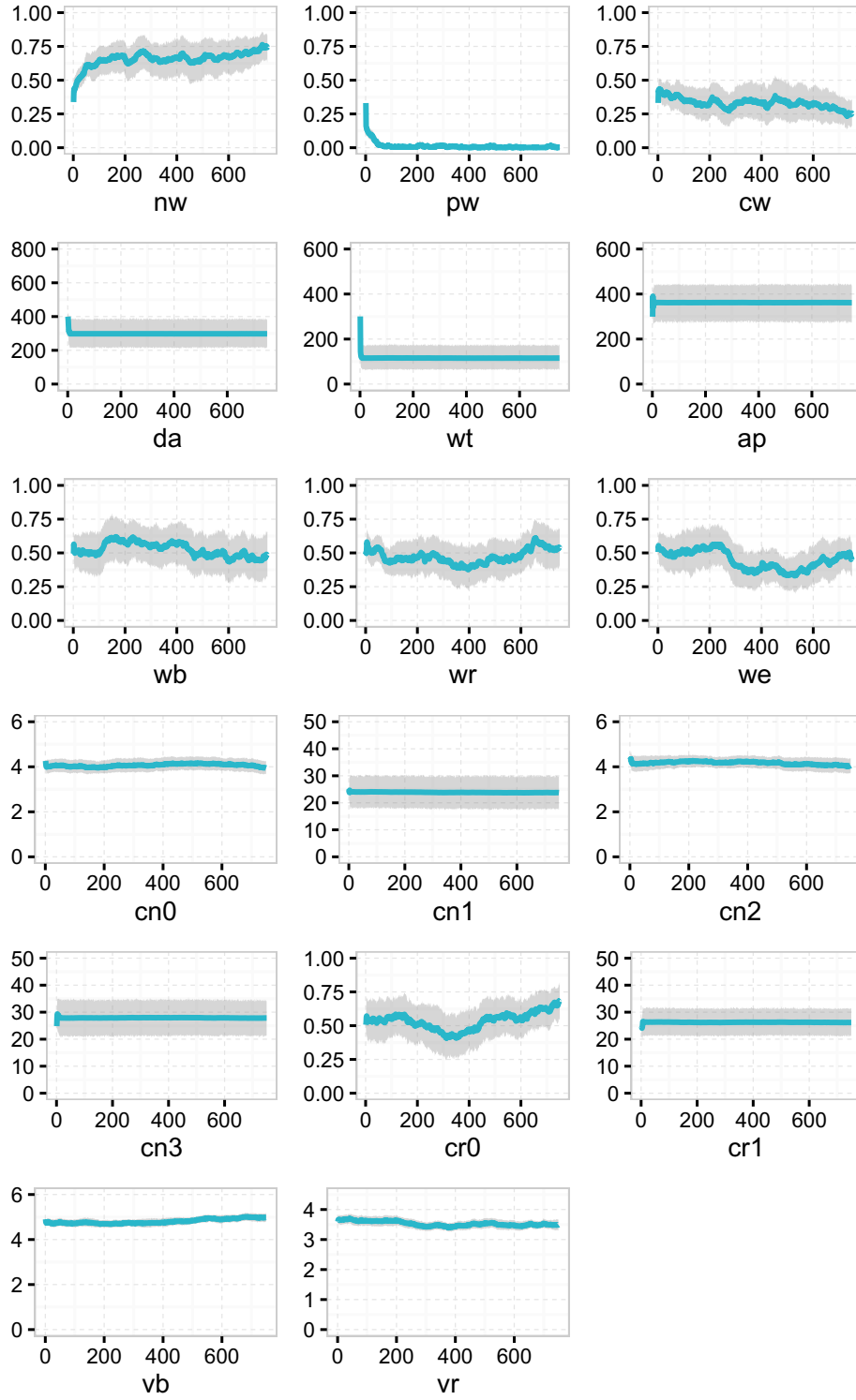
Slika A.2: Evolucija parametrov plena pri DP z zmedljivostjo ob poskusu ulova (CM).



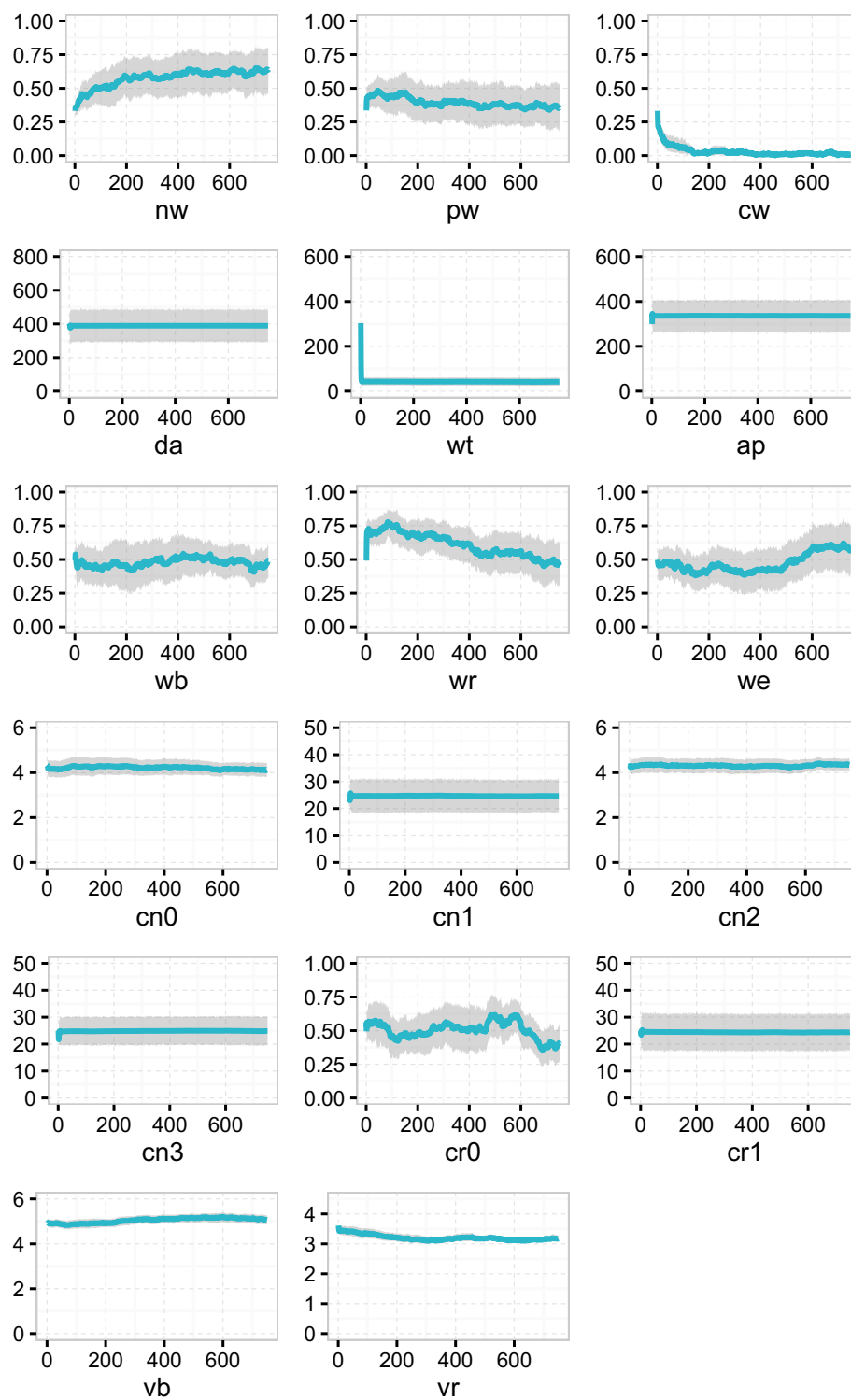
Slika A.3: Evolucija parametrov plena pri BP z zmedljivostjo med lovom (CF).

Dodatek B

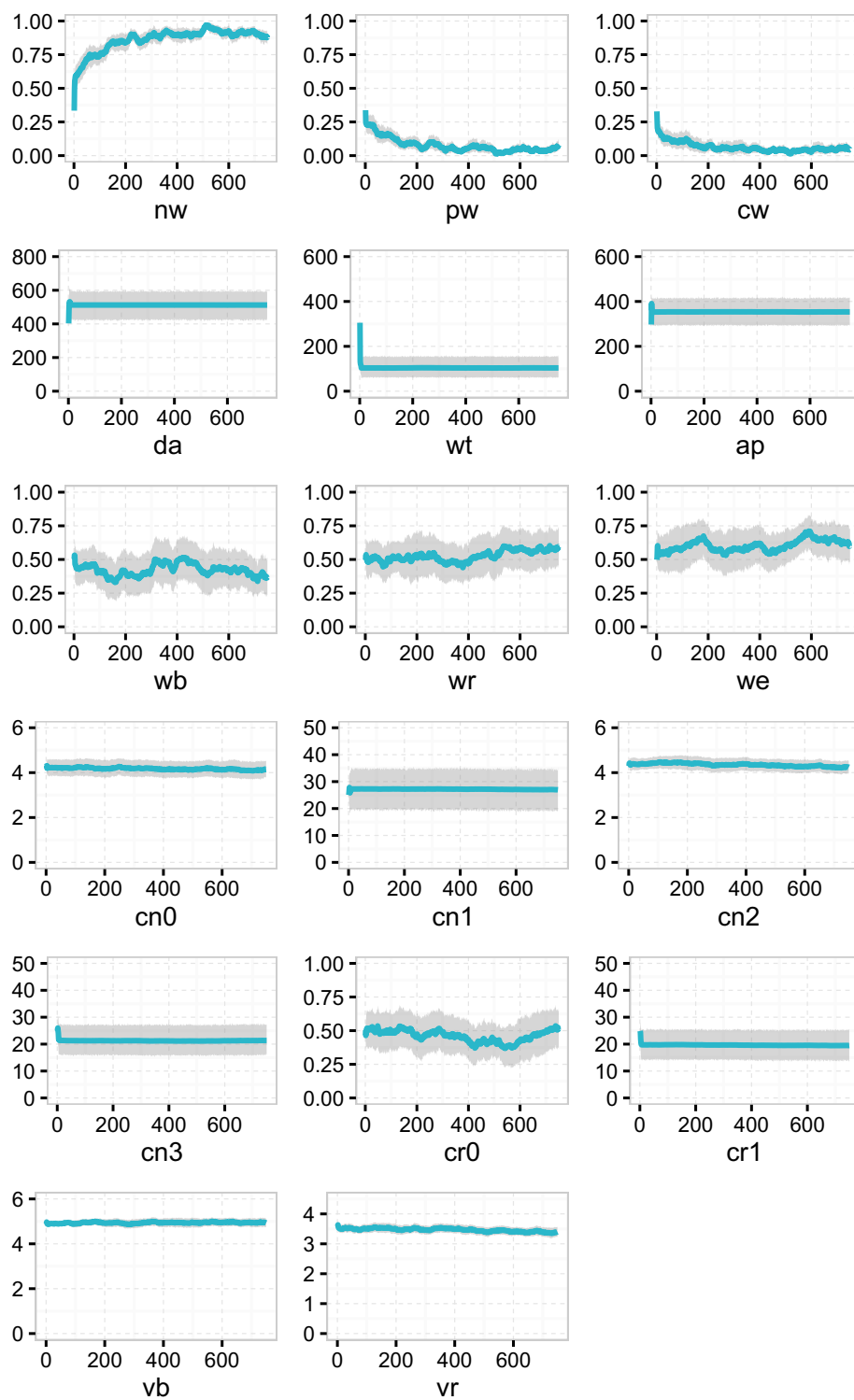
Grafi evolucije energijskih parametrov plenilca



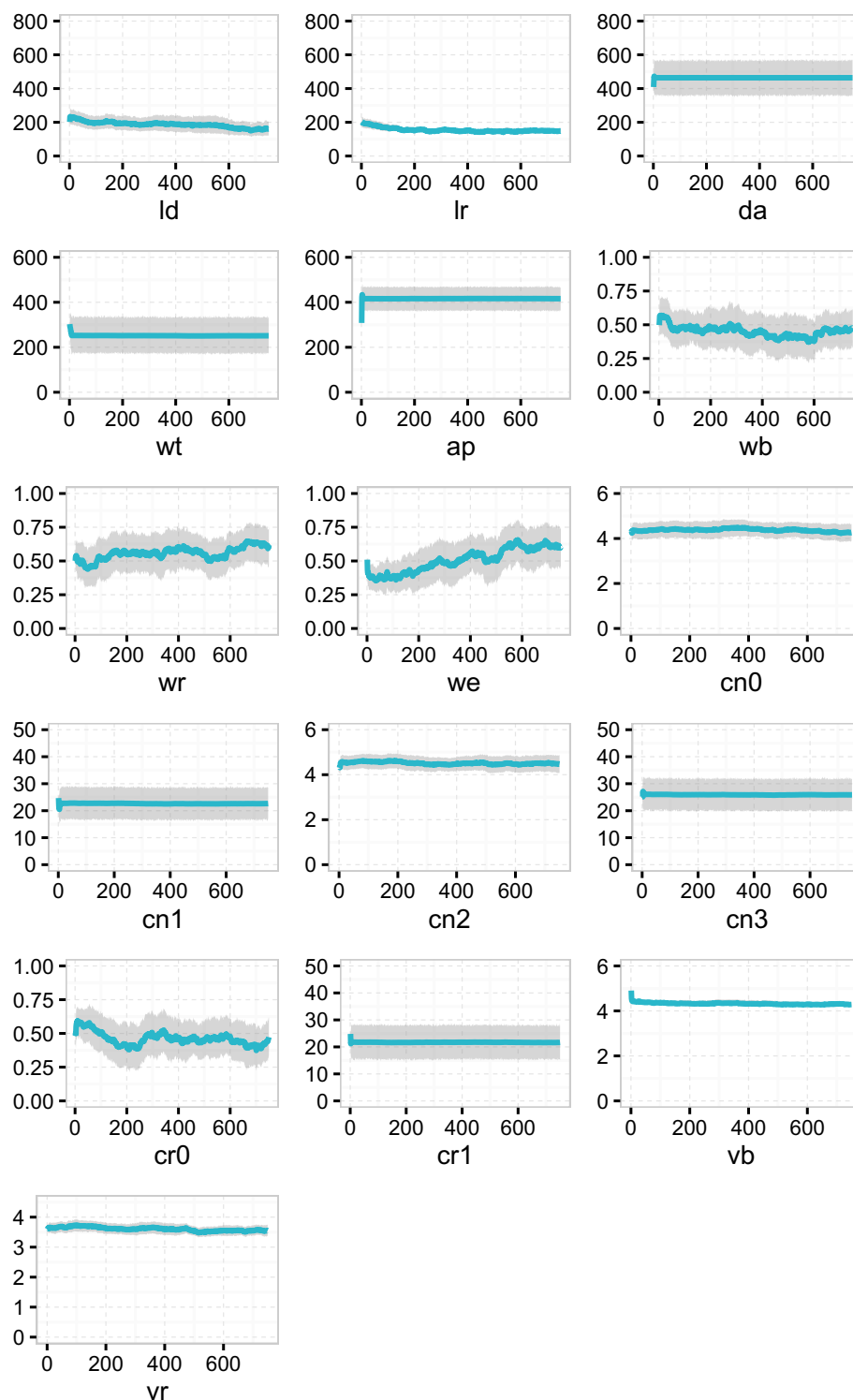
Slika B.1: Evolucija parametrov nezmedljivega plenilca BP (NC).



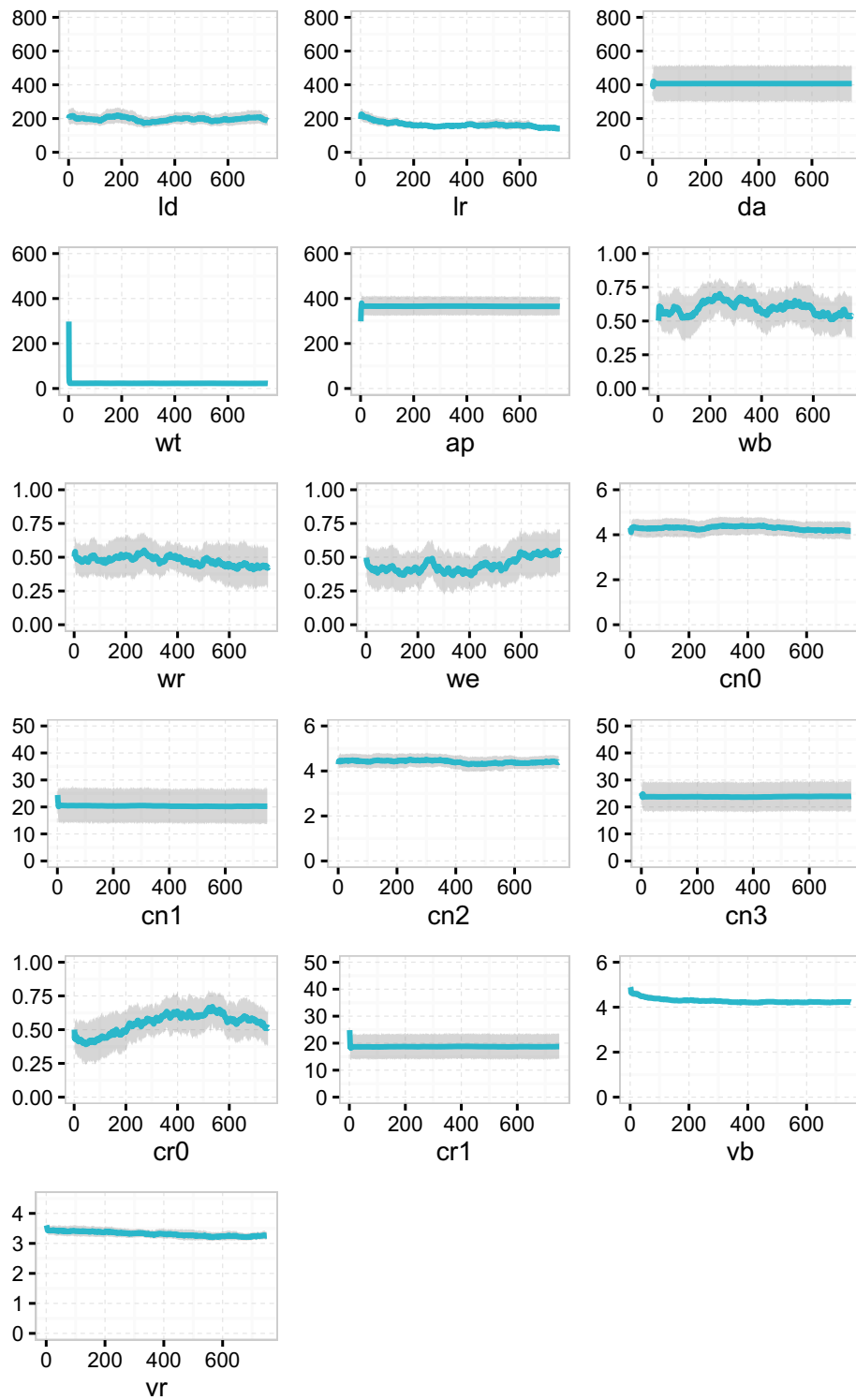
Slika B.2: Evolucija parametrov plenilca BP z zmedljivostjo ob poskusu ulova (CM).



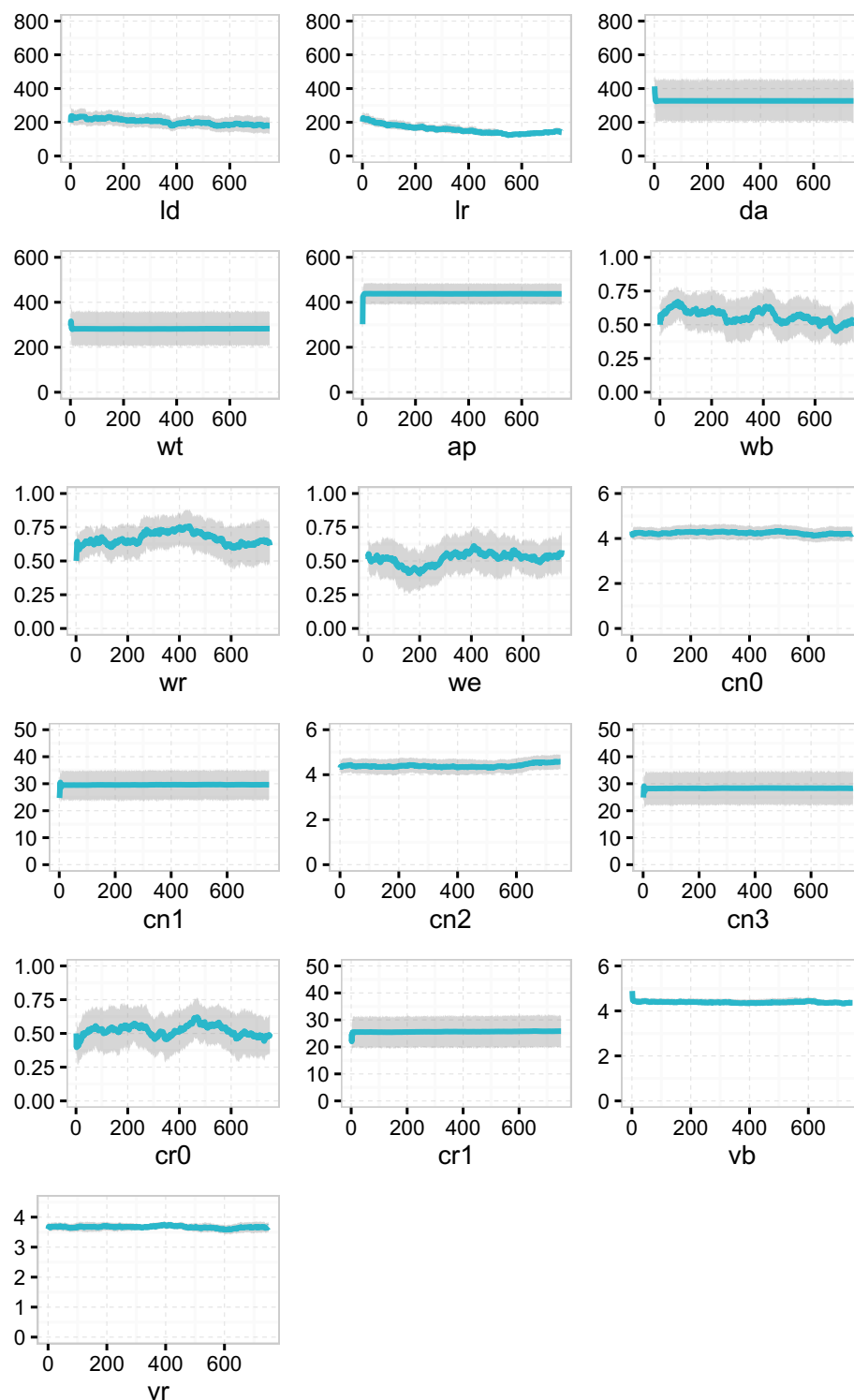
Slika B.3: Evolucija parametrov plenilca BP z zmedljivostjo med lovom (CF).



Slika B.4: Evolucija parametrov nezmedljivega plenilca DP (NC).



Slika B.5: Evolucija parametrov plenilca DP z zmedljivostjo ob poskusu ulova (CM).



Slika B.6: Evolucija parametrov plenilca DP z zmedljivostjo med lovom (CF).